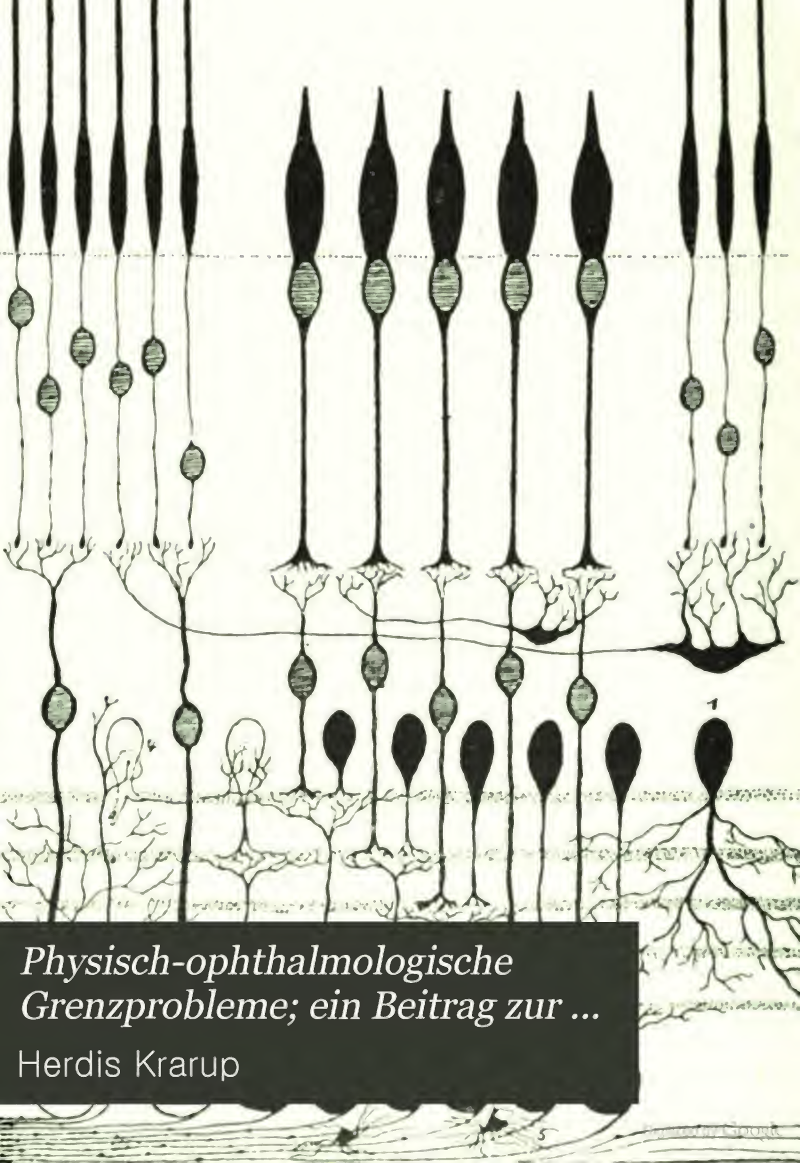


Physisch-ophthalmologische Grenzprobleme; ein Beitrag zur ...

Herdis Krarup

Physisch-ophthalmologische Grenzprobleme

Ein Beitrag zur Farbenlehre

Von

Herdis Krarup

Magister artium

Leipzig 1906

Verlag von Georg Thieme

Druck von Oscar Brandstetter in Leipzig.

Meinem Vater und Lehrer

Magister scientiarum und pr. Arzt

CHRISTIAN KRARUP

in Liebe und Dankbarkeit

gewidmet.

Vorwort.

Bei dem hier gemachten Versuche, einige der wesentlichsten Farbenprobleme zu behandeln, habe ich von verschiedenen Seiten Hilfe erfahren. So erwies mir Prof. K. Ångström in Upsala das Wohlwollen, mir seine (damals) noch nicht veröffentlichten Versuche mit dem Hefnerlicht zur Verfügung zu stellen. Ich benutze daher diese Gelegenheit, Prof. Ångström dafür zu danken, daß er mir so bereitwillig beigestanden ist. — Eine wesentliche Hilfe ist mir außerdem aus Deutschland zuteil geworden, indem der jüngst verstorbene Prof. Arthur König in Berlin mir wichtige Aufschlüsse über seine Farbenversuche gegeben hat. Da ich mich in so überwiegendem Grade auf Prof. Königs mustergültige Versuche gestützt habe, fühle ich mich gedrängt, auszusprechen, welche Bedeutung die Arbeiten und privaten Mitteilungen dieses leider so früh dahingeschiedenen Forschers für mich gehabt haben. — In Prof. v. Kries' Laboratorium in Freiburg haben auch noch die Herren Dr. Angier und Dr. Trendelenburg eine Reihe Komplementärversuche angestellt, über die ich verfügen konnte, und ich kann meinen Dank für die Liebenswürdigkeit, womit sowohl Prof. v. Kries als auch seine Mitarbeiter mir ihren wertvollen Beistand angedeihen ließen, nicht genugsam aussprechen. — Daß es mir überhaupt möglich wurde, jetzt meine Arbeit zu vollenden, verdanke ich der Direktion des Carlsbergerfonds, weshalb ich auch dieser meinen ehrerbietigen Dank ausspreche.

Kopenhagen.

Herdis Krarup.

In gegenwärtiger Abhandlung sind u. a. einige experimentale Untersuchungen erwähnt, die ich im Jahre 1901 in dem psychophysischen Laboratorium der Kopenhagener Universität, dem Dr. Alfr. Lehmann vorsteht, unternommen habe. Um naheliegenden Mißverständnissen vorzubeugen, will ich indes ausdrücklich hervorheben, daß ich trotzdem bestimmten Abstand von dem sog. psychodynamischen System nehme, das Dr. Lehmann im zweiten und namentlich im dritten Teile seines Werkes: „Die körperlichen Äußerungen psychischer Zustände" zu konstruieren versucht hat.

Herdis Krarup.

Inhaltsverzeichnis.

Einleitung.

Bekanntlich gibt es zu jeder Zeit Wissenschaften, denen es schwer wird, ihre Existenzberechtigung zu erweisen. In unseren Tagen wird die Schwierigkeit — soweit sie von kompetenter Seite ausgeht — zunächst wohl darin liegen, daß man allzusehr dazu versucht ist, sich die exakte Wissenschaft zum Muster zu nehmen. Ausgehend von einer berechtigten Bewunderung für dieses ideale Vorbild, wird man dazu geneigt, die große und tüchtige Arbeit zu unterschätzen, die oft auf Gebieten geleistet werden kann, wo es im vornhinein gewiß ist, daß wir nicht eine Sicherheit und Genauigkeit in der Beweisführung erreichen können, die sich mit der messen kann, die wir in den mathematischen und physischen Wissenschaften finden. Es wird, wenigstens in der Praxis, noch bei weitem nicht anerkannt, daß „ein Beweis" innerhalb der verschiedenen Wissenschaften etwas so Verschiedenes sein kann, daß wir Grund dazu haben können, von Beweisen höherer und niederer Ordnung zu sprechen. Man kann das beklagen, aber so sehr man auch wünschen könnte, alle Beweise der verschiedenen Wissenschaften in die vornehmste Klasse, d. h. zu den Beweisen der exakten Wissenschaften, zu erheben, so kann es doch nicht nützen, die Augen zu schließen angesichts der unzweifelhaften Tatsache, daß wir auf vielen Gebieten in unseren Beweisen uns mit einem niederen Grad von Wahrscheinlichkeit begnügen müssen, wenn wir uns überhaupt an dem Fortschritt versuchen wollen, worauf jede wissenschaftliche Entwicklung basiert ist. Der Versuch kann in gerader Linie vorwärtsgehen, und er kann auch auf gewundenen Wegen fortschreiten, ja zuweilen geht man leider auch ein gutes Stück zurück; was Fortschritt und was Rückschritt bedeutet, wird man oft erst sehen können, wenn man an einem vorläufigen Ruhepunkte angelangt ist. Es ist indessen keineswegs ausgemacht, daß man immer am weitesten kommt, wenn man das Ideal allzu hoch stellt; es ist keineswegs ausgemacht, daß man am weitesten kommt, wenn man a priori den höchsten Grad wissenschaftlicher Wahrscheinlichkeit verlangt. Tut man das, so setzt man sich einer bedeutenden Gefahr aus, gar nicht vom Fleck zu kommen, weil der

Abstand zwischen dem, was zurzeit erreicht werden kann, und dem, was man zu erreichen strebt, in diesem Falle allzu groß wird. — Auf der andern Seite muß man sich natürlich auch nicht mit einer allzu geringen Wahrscheinlichkeit begnügen; das Bestreben muß dahin gehen, zu der Sicherheit zu gelangen, die einstweilen erreicht werden kann; man wird dann auf Grund dessen, was man so gewonnen hat, für die Zukunft an die Beweisführung immer größere Forderungen stellen können und auf diese Weise immer mehr festen Grund unter seine Füße bekommen.

Diese Betrachtungen sollen nicht der physisch-ophthalmologischen Problemlehre, zu der ich hier einen Beitrag zu liefern versucht habe, zur Verteidigung dienen. Bis zu einem gewissen Grade braucht diese ebensowenig ihre Existenzberechtigung zu verteidigen wie die Physik oder die Ophthalmologie. Es war nur beabsichtigt, womöglich zu verhindern, daß man an die Resultate, zu denen ich gekommen zu sein glaube, und an die Hypothesen, die ich verteidigt habe, einen allzu feinen Maßstab anlege. Es scheint mir nicht überflüssig, hervorzuheben, daß zur richtigen Beurteilung dieser Arbeit eine genaue Kenntnis der bald größeren, bald kleineren Genauigkeit erfordert wird, die man auf dem Sinnesgebiete, womit ich mich beschäftigt habe, erreichen zu können erwarten darf. Man wird in der einschlägigen Fachliteratur hinreichend Material finden können, um sich im großen und ganzen eine wohlbegründete Meinung bilden zu können, welche Anforderungen man hier an einen Beweis zu stellen berechtigt ist. Daraus geht hervor, daß man bei Untersuchung physisch-ophthalmologischer Farbenprobleme nicht oder doch nur ausnahmsweise erwarten darf, daß man zu exakten Ergebnissen komme. Wenn nun auch dies im voraus sicher genug ist, wird es doch dem, der auf solchen verhältnismäßig unsicheren Gebieten arbeitet, scheinen, daß auch ein Wahrscheinlichkeitsbeweis etwas niederen Ranges von Bedeutung sein kann. Vielleicht bleibt diese Bedeutung nur eine vorläufige, vielleicht werden diese Untersuchungen nur ein untergeordnetes Mittel für den, der später die richtige, endliche Lösung der Probleme findet; will man indessen vorwärts kommen, so muß man etwas wagen, also es auch wagen, sich auf Beweise niederer Ordnung zu stützen.

Mit Rücksicht auf den besonderen Gegenstand, den ich zu meinem Studium gewählt, will ich nur noch ein paar historische Bemerkungen machen. Die Hilfswissenschaften, auf die man sich hier stützen kann, haben in den letzten 20 Jahren große und sichere Fortschritte gemacht, deren Bedeutung für die behandelten Probleme noch nicht genugsam beachtet wird. Das gilt in erster

Linie von der retinalen Anatomie, die nach 1880 langsam, aber in so glänzender Weise gezeigt hat, auf welchen Wegen eine Lichteinwirkung sich von der Stab-Zapfenschicht der Netzhaut zum Zentralorgan verpflanzt.[1])

Nimmt man dazu noch, daß die Anatomen, die sich mit der Retina beschäftigen, gestützt auf die komparative Anatomie, einen sehr wertvollen Beitrag zur Lösung der Frage über das Verhältnis zwischen der Funktion der Stäbe und der Zapfen geliefert haben, so kann es nicht anders sein, als daß die ganze Grundlage für die Farbenlehre und die Hypothesen, die mit dieser in Verbindung stehen, eine durchgreifende Veränderung erfahren haben. Hierauf ist man zuerst in Frankreich aufmerksam geworden, wo Parinaud — der dort übrigens ziemlich isoliert dasteht — nachgewiesen hat, welche Bedeutung man den neusten Erfahrungen betreffs der Anatomie der Retina beilegen und welche Schlüsse man daraus ziehen kann. Die Engländer haben meines Wissens keinen nennenswerten Beitrag zu dieser Diskussion geliefert, aber in Deutschland findet sich eine ganze Schule von Forschern, die namentlich unter v. Kries' Leitung aufmerksam dem Fortschritt der retinalen Anatomie gefolgt sind, und hernach mittels einer Reihe ausgezeichneter Experimente und logischer Schlüsse eine wirklich zuverlässige und, wie mir scheint, ganz unwiderlegliche Theorie aufgebaut haben.

Merkwürdigerweise sind die Ophthalmologen, wenigstens bis zur jüngsten Zeit, dieser ganzen Bewegung ziemlich teilnahmslos gegenübergestanden. Parinaud, der selbst Ophthalmolog ist, macht sehr energisch darauf aufmerksam, welch konservative Haltung die Ophthalmologen eingenommen haben, während die Farbenlehre sich allmählich ein solides Fundament gebaut hat.[2])

Die Erklärung dieser Tatsache muß wahrscheinlich darin gesucht werden, daß die praktische Seite der Wirksamkeit der Ophthalmologen von dem Fortschritte innerhalb der physiologischen Optik noch nicht sonderlich berührt wird. Es würde aber doch —

[1]) In Gräfe-Sämisch' Handb. d. ges. Augenheilkunde, 2. Aufl., schreibt Greff p. 75 folgendes: Wir können heute auf mehrere Hunderte von Arbeiten über die Retina zurückblicken, von denen die einzelne Arbeit, auf ihre Vorgängerinnen aufbauend, durch Kritik und Prüfung des Vorhandenen und Suchen nach neuen Wegen unsere Kenntnisse oft nur um ein Minimales gefördert hat, deren Gesamtheit uns jedoch einen herrlichen Beweis liefert, wie weit es menschlicher Fleiß und gewissenhafte Forschung mit der Zeit in der Lösung auch der schwersten Probleme bringen kann.

[2]) Les ophtalmologistes, par habitude, par respect du principe d'autorité, rééditent encore de nos jours les mêmes théories, les mêmes idées métaphysiques, en termes qui, parfois nous reportent au temps où l'on expliquait l'ascension de l'eau dans les pompes par l'horreur de la nature pour le vide (Parinaud: la Vision 1898 p. 5).

besonders da die Untersuchung der Farbenblindheit den Ophthalmologen obliegt — entsprechend sein, wenn diese dem Aufschwunge, den die Farbenlehre in der neuesten Zeit genommen hat, mit etwas größerer Aufmerksamkeit folgten. Ich habe deshalb, während ich diese Abhandlung niederschrieb, bei meiner Arbeit fortwährend die Möglichkeit vor Augen gehabt, daß sie auch den Ophthalmologen zustatten käme, die etwa einen Überblick über den gegenwärtigen Stand der Farbenlehre zu bekommen wünschten.

Bestimmung von Farbenquantitäten.

Es wird jedermann, der sich mit der physisch-ophthalmologischen Problemlehre beschäftigt hat, bekannt sein, daß der wissenschaftliche Fortschritt hier durch mannigfache fundamentale Unvollkommenheiten gehemmt wird. Darunter ist vielleicht eine der auffallendsten die mangelhafte Quantitätsangabe, der man immer und immer wieder begegnet. Man muß wohl gestehen, daß die quantitativen Resultate der letzten Jahrzente oft — und das gilt besonders von Königs und Kries' Schulen in Deutschland — mit Hilfe so tadelloser Methoden gefunden sind, daß man die wesentlichsten der Ursachen zu Fehlern eliminiert hat, die bei solchen Untersuchungen von Bedeutung sein können; nichtsdestoweniger wird man aber meistens außerstande sein, seine eigenen quantitativen Resultate mit denen anderer zu vergleichen, weil die Art und Weise, wie die Quantitäten angegeben sind — nämlich mittels Spaltbreiten — eine Vergleichung nur unter ganz gleichartigen instrumentalen Bedingungen zulassen, die nicht jeder zu schaffen vermag. Wenn z. B. angegeben wird, daß man, um Weiß bei Mischung von zwei Komplementärfarben zu sehen, den Spalten des benutzten (vielleicht recht komplizierten) Spektralapparates die und die Breite geben muß, so wird dies bei Vergleichsversuchen nur genugend sein, wenn man entweder im Besitze eines ganz analogen Apparates ist oder die Energieverteilung in dem Spektrum kennt, mit dem gearbeitet wurde.

Bis vor ganz kurzer Zeit hat man indessen hier mit Rücksicht auf Energiebestimmungen den so unentbehrlichen Beistand von seiten der Physiker vermißt. Es wird genugen, nur die Energieverteilung fur eine einzige konstante Lichtquelle zu kennen, die dann photometrisch mit andern verglichen werden kann; aber eine so ganz verlaßliche Energiekurve, die man mit voller Zuversicht hatte als Ausgangspunkt benutzen konnen, war bis zum Jahre 1902 in der Literatur nicht zu finden. Es war daher von wesentlicher

Bedeutung auch für die Farbenlehre, als Professor K. Ångström die Energieverteilung im Hefnerlicht bestimmte.[1]) Es wird, wie gesagt, genügen, nur die Energieverteilung in einer einzigen konstanten Lichtquelle zu kennen, also z. B. im Spektrum des Hefnerlichtes; man wird dann durch photometrische Vergleichung der einzelnen Stellen im Spektrum des Hefnerlichtes mit entsprechenden Stellen im Spektrum jeder andern beliebigen konstanten Lichtquelle die Energiekurve dieser andern Lichtquelle finden, vorausgesetzt, daß man fortwährend Prismen mit derselben Dispersion benutzt. Die gesuchte Energie findet man nach der bekannten Gleichung $\frac{Ea_{\lambda n}}{Eh_{\lambda n}} = \frac{Ha_{\lambda n}}{Hh_{\lambda n}}$, wo die linke Seite der Gleichung das Verhältnis angibt zwischen der Energie in der untersuchten Lichtquelle (a) und der Energie im Hefnerlicht (h) bei der Wellenlänge $\lambda = n$, und wo die rechte Seite der Gleichung das Verhältnis zwischen der Lichtstärke in der untersuchten Lichtquelle und im Hefnerlichte ebenfalls bei $\lambda = n$ angibt.

Eine bedeutende Hilfe bei solchen Berechnungen von Energiekurven mit der Energiekurve des Hefnerlichtes als Ausgangspunkt ist hier für mich der Umstand gewesen, daß Frl. E. Köttgen eine Reihe sehr fein ausgeführte photometrische Vergleichungen zwischen dem Hefnerlicht und den am häufigsten angewandten Lichtquellen (mit Ausnahme elektrischen Lichtes) vorgenommen hat.[2]) — Eine Schwierigkeit bei Umrechnung quantitativer Resultate von andern aus der Spaltbreite in die Energie habe ich indessen darin gefunden, daß verhältnismäßig viele Quantitätsbestimmungen unter Gebrauch von Sonnenlicht vorgenommen sind. Dies erschwert jede zuverlässige Umrechnung im hohen Grade. Solange es sich doch wenigstens um direktes Sonnenlicht (am besten Heliostatenlicht) handelt, kann man einigermaßen sicher vorgehen, ist aber, was in der Regel der Fall sein wird, Licht von blauem, weißem oder bedecktem Himmel benutzt, so werden die Begriffe fließend. Denn erstens kann man in diesem Falle nicht ganz auf die Konstanz des Lichtes bauen, und dann — was das wesentlichste ist — kann man nicht wohl wissen, ob bei den verschiedenen Autoren unter blauem, weißem oder bedecktem Himmelslicht immer dasselbe verstanden wird. Diese Lichtarten können nicht bestimmt definiert werden, und deren Energiekurven sind, wie man unten sehen wird, sehr verschieden. Da es bequem sein dürfte, Energiekurven für einige

---

[1]) Energie dans le spectre visible de l'étalon Hefner. Nova Acta Reg. Soc. Sc. Upsala Ser. III, Pl. II.

[2]) Wied. Ann. 1894 Bd. 53, p. 793—812.

der am häufigsten angewandten Lichtarten an einer Stelle beisammen zu finden, habe ich auf Tabelle I sowohl einzelne direkte Energiebestimmungen als auch die Umrechnungen, die ich mit Hilfe der photometrischen Resultate Frl. Köttgens und der Energiekurve Prof. Ångströms für das Hefnerlicht vorgenommen habe, um Spaltbreitenangaben auf Energie überzuführen, zusammengestellt. (S. Tabelle I und auch Fig. I, die einige der typischesten Energiekurven zeigt.) Alle Energiekurven sind mit der des Hefnerlichtes auf denselben Wert gebracht bei $\lambda = 590$. Überall ist Flintglasprisma benutzt. Daß verschiedene Flintglasprismen nicht genau dieselbe Dispersion haben, wird hier keine Bedeutung haben, da die maximale Dispersionsdifferenz sehr unbedeutend ist.[1])

Professor Ångström teilte mir etwas früher, als seine Untersuchungen abgeschlossen wurden, folgende Formel für die relative Energieverteilung im Spektrum des Hefnerlichtes mit: $E = C \cdot \lambda^{\div 5} \cdot e^{\div \frac{8}{\lambda}}$ (E = Energie, e = Basis für das natürliche Logarithmensystem, λ = Wellenlänge in μ). Mit Rücksicht auf den Wert von C sehe man Professor Ångströms angeführte Abhandlung, da es nur die relativen Werte von E bei verschiedenen Wellenlängen sind, die für unsere Untersuchungen Bedeutung haben. Hinsichtlich der Bedeutung der Größe E sei hier nur bemerkt, daß die Energie $E_{\lambda_1}^{\lambda_2}$ des Strahlenbündels zwischen den Wellenlängen λ_1 und λ_2 bezeichnet werden kann mit $E_{\lambda_1}^{\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E d\lambda$. Da $\left(C \cdot \lambda^{\div 5} \cdot e^{\div \frac{8}{\lambda}}\right)$ in Ångströms Formel für die verschiedenen Werte von λ sehr kleine Zahlenwerte hat, ist es bequemer, beide Seiten der Gleichung mit einem Zahlenfaktor k zu multiplizieren, so daß man also $kE = kC \cdot \lambda^{\div 5} \cdot e^{\div \frac{8}{\lambda}}$ erhält. In einer graphischen Darstellung, die Professor Ångström mir sandte, ist $kC = 21100$ gesetzt, also $kE = 21100 \cdot \lambda^{\div 5} \cdot e^{\div \frac{8}{\lambda}}$. Dieser Wert ist sowohl in Tabelle I wie bei späteren Berechnungen benutzt.

In den ersten vier Kolonnen in Tabelle I sind verschiedene direkte Energiemessungen angeführt. Vergleicht man Kolonne 1, die die Energieverteilung im Hefnerlichte zeigt, mit Kolonne 2, die die Energieverteilung in einer elektrischen Glühlampe (der Nernstlampe) zeigt, so sieht man, daß der Unterschied zwischen diesen zwei Energiekurven nicht sehr bedeutend ist. A. Pflüger hat das große Verdienst, die Energieverteilung in der Nernstlampe bestimmt zu haben[2]); da aber Ångström eine vollständige Übereinstimmung zwischen Hefnerlicht und einer elektrischen Glühlampe — mit Rücksicht auf Energie — fand, und Pflügers Versuche doch nur eine Abweichung im Rot zeigen, kann man es vorläufig vielleicht als zulässig betrachten, mit der Energieverteilung im Hefnerlichte zu rechnen, wenn bei

[1]) Landolt und Börnstein: Physikalisch-chemische Tabellen. Tabelle 160 p. 417.

[2]) Drudes Annalen Bd. p. 190. 1902.

Tabelle I.

λ	Direktes Energiemaß				Ångström-Köttgen								König-Langley
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Hefnerlicht Ångström	Nernstlicht Pflüger	Sonnenlicht Langley	Sonnenlicht Lamansky	Sonnenlicht	Weiße Wolken	Bedeckter Himmel	Blauer Himmel	Auerlicht	Petroleum-Flachbrenner	Petroleum-Rundbrenner	Gas-Triplexlicht	Gas-Triplexlicht
690	1,24		0,61	0,47	0,38	0,46	0,32	0,26		1,24	1,30		
670	1,02	1,07	0,56	0,46	0,38	0,47	0.34	0,31	0,50	1,01	1,04	1,03	1,66
650	0,82	0,77	0,51	0,44	0,38	0,46	0,35	0,33	0,48	0,81	0,83	0,82	1,14
630	0,65	0,60	0,47	0,42	0,40	0,45	0,37	0,35	0,46	0,64	0,65	0,65	0,80
610	0,50	0 48	0,43	0,40	0,40	0,41	0,38	0,37	0,43	0,50	0,50	0,50	0,55
590	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
570	0,28	0,30	0,34	0,36	0,38	0,44	0,44	0,44	0,33	0,28	0,28	0,28	0,27
550	0,20	0,22	0,30	0,33	0,37	0,43	0,45	0,46	0,29	0,20	0,20	0,20	0,18
530	0,15	0,16	0,25	0,29	0,38	0,44	0,48	0,52	0,24	0,15	0,16	0,15	0,11
510	0,09	0,10	0,20	0,23	0,33	0,39	0,43	0,52	0,18	0,09	0,10	0,09	0,07
490	0,06	0,06	0,17	0,17	0,33	0,40	0,44	0,57	0,14	0,06	0,07	0,06	0,05
470	0,04	0,04	0,13	0,12	0,35	0,48	0,53	0,73	0,10	0,04	0,04	0,04	0,03
450	0,03	0,02	0,10	0,09	0,41	0,60	0,74	1,02	0,07	0,03	0,03	0,03	0,02
430	0,01	0,01	0,07	0,06	0,20	0,31	0,37	0,62	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01

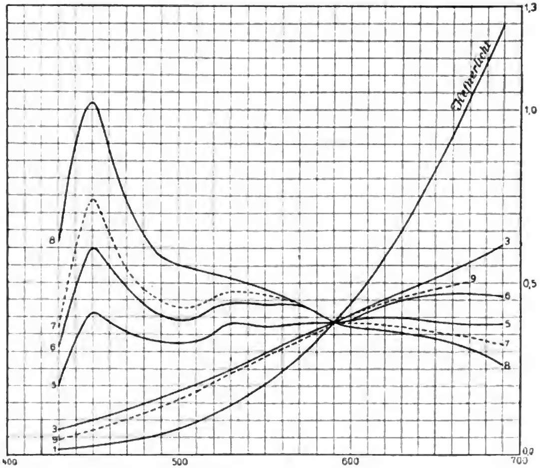


Fig. I.

den Versuchen elektrische Glühlampen benutzt wurden. — In Kolonne 3 und 4 sind Langleys[1]) und Lamanskys[2]) Energiemessungen für direktes Sonnenlicht angeführt. Beide Verfasser haben Heliostatenlicht benutzt, und ihre Resultate sind, wenn auch nicht gleich, so doch nicht mehr verschieden, als daß sie noch benutzt werden können. Daß diese beiden Kurven hinter den Energiekurven des Hefnerlichtes zurückstehen, ist doch sehr wahrscheinlich, u. a., weil die Stelle des Wärmemaximums in der Energiekurve nach Lamanskys Aussage etwas verschieden liegt, selbst zu verschiedenen Stunden desselben Vormittags. Auf Grund dieser Inkonstanz allein wird es nicht gut sein, von der Energiekurve des direkten Sonnenlichtes auszugehen, das übrigens auch nicht immer bequem ist bei photometrischem Gebrauche. Sowohl Langleys als Lamanskys Versuche zeigen für das direkte Sonnenlicht bedeutend geringere Werte in dem roten Ende des Spektrums als die Energiekurve für Hefnerlicht. Dies konnte man auch erwarten, da selbst eine flüchtige Beobachtung zeigt, daß das Hefnerlicht bedeutend rötlicher ist als das direkte Sonnenlicht.

Mit Kolonne 5 beginnt die Reihe jener Energiekurven, die mittels Prof. Ångströms Energiekurve für Hefnerlicht und Frl. E. Köttgens photometrischer Resultate abgeleitet sind. Kolonne 5 zeigt die Energieverteilung im direkten Sonnenlicht, indem bei der Umrechnung in Energie die Durchschnittszahl von 2 nicht sehr verschiedenen Versuchsreihen bei Frl. Köttgen benutzt sind. Man wundert sich gleich, wenn man sieht, wie bedeutend diese Kurve von der Langleys und Lamanskys abweicht; aber die Abweichung wird erklärlich, wenn man auf die Bedingungen achtet, unter denen Frl. Köttgen das Licht der Sonne anwandte. Es war, sagt sie, unmöglich, das direkte Sonnenlicht zu untersuchen, wenn man den Spalt des Spektralapparates gegen die Sonne richtete, weil deren scheinbarer Diameter, durch den Apparat gesehen, einen zu kleinen Teil des Gesichtsfeldes ausfüllte; es mußte deshalb vor dem Spalt des Spektroskops ein Mattglas angebracht werden, und das bewirkte, daß vorbeiziehende Wolken einigen Einfluß auf die Resultate haben konnten. Man kommt zu der Vermutung, daß dieser Einfluß nicht unwesentlich gewesen ist, wenn man sieht, wie wenig diese Energiekurve für das direkte Sonnenlicht (5) der Langleys und Lamanskys (3 und 4) gleicht, und wie wenig sie — besonders hinsichtlich der Form — der Energiekurve gleicht, die man erhält, wenn man das Spektroskop gegen einen weißen Himmel richtet (siehe Fig. I und Kolonne 6).

[1]) Researches on Solar Heat. 1884. Plate XI.

[2]) Pogg. Ann. Bd. 146. p. 207 f. 1892.

Die Reihen 6, 7 und 8 zeigen die Energie in verschiedenen Arten von Himmellicht, und man sieht, daß diese Energiekurven untereinander sehr verschieden sind — besonders im Blauen —, wenn sie auch in der Form gut übereinstimmen. Dies zeigt wieder, wie ungünstig man gestellt ist, wenn man eine Umrechnung von Quantitätsbestimmungen, die bei solchem Lichte ausgeführt sind, von Spaltbreite in Energie vornehmen will. Die Genauigkeit, die man hier zu erreichen hoffen darf, ist nur allzu gering, und es würde die gemeinsame Arbeit bedeutend erleichtern, wenn man in Zukunft es unterlassen würde, das Sonnenlicht zu benutzen, wo nicht besondere Gründe dafür sprechen.

Kolonne 9 zeigt dagegen die Energieverteilung in einer Lichtquelle, mit der man sehr praktisch arbeiten kann, nämlich dem Gasglühlicht, dem Auerlicht. Das Auerlicht ist stark und innerhalb langer Zeiträume sehr konstant; seine Energiekurve fällt ziemlich zusammen mit den verläßlichsten Energiekurven für das direkte Sonnenlicht (3 und 4)[1]. Ganz konstant ist das Auerlicht doch bekanntermaßen nicht; es verändert sich im Laufe der Zeit, so daß es nach und nach schwächer und rötlicher wird. Man könnte sich deshalb einmal eine genaue Angabe wünschen, wie lange ein Auernetz brennen kann, ohne Farbe oder Lichtstärke so sehr zu verändern, daß dies praktische Bedeutung erhält. — Während es genugsam bekannt ist, daß das Auerlicht nach vielen Brennstunden — ohne daß man doch weiß, bei *wie* vielen — schwächer und rötlicher wird, ist es weniger bekannt, daß man das Netz nicht gern zu Versuchen anwenden soll, bevor es ein paar Tage gebrannt hat. Die *relative* Lichtverteilung im Spektrum des Auerlichtes verändert sich, wie Frl. Köttgen gezeigt hat, etwas in den zwei ersten Tagen, verbleibt aber vom zweiten bis zum zwölften Tage konstant (wahrscheinlich bedeutend länger). Die Verschiebung ist jedoch so gering, daß sie nicht sonderlich praktische Bedeutung hat. Wichtiger ist es vielleicht, zu beachten, daß die absolute *Stärke* des Auerlichtes in den ersten 24 Stunden auch etwas verändert wird. Die Ursache hierfür fand St. John[2]) durch folgende Betrachtung:

[1]) Dafür ist aber doch beim Auerlicht eine andere nicht unwesentliche Mißlichkeit. Bei dieser Lichtquelle ist ja die ausstrahlende Oberfläche nicht gleichmäßig, sondern perforiert, und man muß deshalb, bevor man die Strahlen von einem Auerbrenner in einen Spektralapparat eindringen läßt, besondere Veranstaltungen treffen (indem man z. B. die Strahlen zuerst eine weiße Mattglasplatte passieren läßt). Hierdurch wird das Spektrum des Auerlichts etwas geändert, und es ist deshalb möglich, daß eine photometrische Vergleichung zwischen dem Auerlicht und einem andern Licht (z. B. Hefnerlicht) in verschiedenen Laboratorien zu etwas abweichenden Resultaten führen kann, wenn man nicht unter ganz gleichgearteten Versuchsbedingungen arbeitet.

[2]) Wied. Ann. 1895. Bd. 56.

Das Auernetz besteht, sagt er, aus einem Gewebe von Pflanzenfäden, die in Metallsalze, die sogen. Auersche Lösung, getaucht sind. Wird dieses Netz angezündet, so verbrennt das Pflanzengewebe, und es bleibt nur ein Glühkörper von Oxyd zurück. Durch das Anzünden zieht das Netz sich stark zusammen, etwa so viel, daß es nur die Hälfte seiner ursprünglichen Ausdehnung hat. St. John kam da auf den Gedanken, daß diese Zusammenziehung beim Anzünden vielleicht nicht ganz zu Ende gebracht wird. Um das zu erproben, untersuchte er mit Hilfe eines Mikroskops ein soeben angezündetes Netz und fand, daß der Durchmesser der großen Fäden des Netzes als Durchschnitt von 50 Messungen die Zahl 0,177 mm ergab. Nachdem das Netz 22 Stunden geglüht hatte, wurde es neuerdings mikroskopisch untersucht, und der Durchmesser war jetzt nur 0,152 mm. Dies zeigt, daß das Netz sich etwas zusammenzieht, was wiederum beweist, daß die ausstrahlende Oberfläche kleiner und damit die Lichtstärke geringer wird.

Die in Kolonne 10, 11 und 12 angegebenen Energiebestimmungen für Petroleum- und gewöhnliches Gaslicht zeigen sowohl untereinander als verglichen mit der Energiekurve für Hefnerlicht eine so große Übereinstimmung, daß es bei den Problemen, die wir hier untersuchen wollen, zulässig ist, mit der Energiekurve des Hefnerlichtes zu rechnen, statt mit der für Gas- und Petroleumlicht. Wenn noch dazu kommt, daß, wie oben gesagt, eine ähnliche Übereinstimmung zwischen der Energie im Hefnerlicht und der im elektrischen Glühlicht konstatiert ist, so kann man nicht leugnen, daß Umrechnung von Farbenquantitäten in Energie dadurch auf eine recht unerwartete Weise vereinfacht wird. Zudem scheint man hiernach vermuten zu dürfen, daß die Energiekurven wahrscheinlich für alle Lichtquellen, deren Lichtwirkung wesentlich darauf beruht, daß Kohlenteilchen zum Glühen kommen, ziemlich gleichgeartet sein werden. Das Auerlicht beruht ja auf einem andern Prinzip, indem man es hier mit glühenden Metallverbindungen zu tun hat; daher wahrscheinlich der Unterschied in der Energieverteilung bei zwei so verwandten Lichtquellen wie gewöhnliches Gaslicht und Gasglühlicht.

In der letzten Kolonne in Tabelle I (13) habe ich eine Energiekurve für gewöhnliches Gaslicht (Triplexbrenner) angegeben, die von A. König[1]) mit Hilfe seiner eigenen photometrischen Vergleichungen zwischen Sonnenlicht und Gaslicht und Langleys Energiekurve für Sonnenlicht ausgerechnet ist. Diese Energiekurve Königs ist doch kaum hinreichend genau, um damit rechnen

[1]) Über den Helligkeitswert der Spektralfarben 1891, p. 62.

zu können, was wahrscheinlich darauf beruht, daß König von einer damals notwendigen, aber zweifelhaften Voraussetzung ausgehen mußte, von der nämlich, daß das Sonnenlicht, das er bei seinen photometrischen Versuchen benutzte, identisch sei mit dem, das Langley zu seinen direkten Energiemessungen benutzt hatte. Ich habe diese Zahlen Königs nur angeführt, um zu begründen, warum ich im folgenden die übrigens ziemlich wenigen Energieangaben, die dieser Autor veröffentlicht hat, nicht benutzt habe. Diese Energieangaben sind auf Grund der oben angeführten zweifelhaften Voraussetzung nicht hinreichend genau, selbst wenn man davon absehen will, daß König zuweilen auf die Absorption in der Macula lutea nicht Rücksicht genommen oder nicht hat Rücksicht nehmen können. Die nicht unwesentliche Bedeutung dieser Absorption werden wir später besprechen.

Mit Hilfe der in Tabelle I angeführten Energiebestimmungen kann man also — unter dem Vorbehalt, der betreffs des Sonnenlichtes und des Auerlichtes gemacht ist — Umrechnungen von Spaltbreite in Energie für die am gewöhnlichsten angewandten Lichtquellen vornehmen. Es ist bisher nur Gewicht gelegt auf die Bedeutung, die dies hat, wenn man die quantitativen Resultate verschiedener Autoren zu vergleichen wünscht. Es ist indessen ganz selbstverständlich, daß es auch aus anderen Gründen Bedeutung hat, Farbenquantitäten in Energie anstatt in Spaltbreite anzugeben. Werden die Quantitäten in Spaltbreite angegeben, so hat dies nur Bedeutung für den benutzten Spektralapparat und die benutzte Lichtquelle, während es, wenn die Quantitäten in Energie angegeben werden, absolute Bedeutung bekommen kann.

Die Absorption in den Medien des menschlichen Auges und in der Macula lutea.

Als Mittel, Farbenquantitäten in absolutem oder in einem damit proportionalen Maße anzugeben, sind im obigen (Tabelle I) Energiebestimmungen für verschiedene Lichtquellen angegeben. Dies wird hinreichend sein, solange man wie die Physiker — und zuweilen auch die Physiologen — sich nur für die Energie außerhalb des Auges interessiert[1]; aber für die physisch-ophthalmo-

[1] Der Physiolog kann ja wünschen, die Energie zu kennen, womit Strahlen von verschiedener Brechbarkeit die Oberfläche des Körpers treffen. Dies kann für die Therapie oder für die Theorie der Therapie von Bedeutung sein, z. B. bei Lichtbehandlung nach N. Finsens Methode.

logische Farbenlehre stellt die Sache sich etwas anders. Das, worauf es hier ankommt, ist nicht die Energie, die die Hornhaut des Auges trifft, sondern die Energie, die zur Netzhaut gelangt; und um diese bestimmen zu können, muß man von der Absorption Kenntnis haben, die stattfindet, bevor die Strahlen zur lichtperzipierenden Schichte der Netzhaut hineingelangen.

In der Hornhaut, in der Wasserflüssigkeit und im Glaskörper wird das Licht zwar absorbiert, aber die Absorption ist, wie die neuesten Untersuchungen gezeigt haben, beinahe gleich stark für Strahlen von verschiedener Brechbarkeit — wenigstens innerhalb des sichtbaren Spektrums. Bei relativen Bestimmungen pflegt man daher auf diese Absorption nicht Rücksicht zu nehmen. — Für die Linse ist das Verhältnis ein anderes, indem es sich hier möglicherweise nicht bloß um eine für alle Strahlen gleichgeartete Absorption handelt, sondern um eine auswählende, die sog. „elektive Absorption". Die Linse des menschlichen Auges ist eine lange Reihe von Jahren beinahe ungefärbt, wird aber mit dem Alter, in der Regel wohl erst gegen das fünfzigste Jahr, etwas (und zuweilen sehr) gelblich. Wir begegnen hier einem wesentlichen Hindernis für genaue Angabe von „retinaler Energie"[1]); denn obwohl man meistens davon ausgehen kann, daß die Linse bei jüngeren Personen nicht sonderlich gelb ist, muß man doch auf Ausnahmen gefaßt sein, da ja durchaus nichts im Wege steht, daß die Linse vor der Zeit alt, d. h. gelb, werden kann. Man ist deshalb immer der Gefahr ausgesetzt, etwas verkehrt zu rechnen, wenn man voraussetzt, daß ein Erwachsener ungefärbte Linsen hat. Eine Massenuntersuchung der Absorption in Linsen auf verschiedenen Altersstufen würde deshalb hier eine gute Richtschnur geben können, ist aber bisher leider noch nicht vorgenommen worden; unsere Kenntnis der Absorption in der Linse ist noch sehr unvollkommen. Ist die Linse gelb geworden, so wird das zur Folge haben, daß vorzüglich die blauen und violetten Strahlen absorbiert werden, so daß das Auge jetzt einen Überschuß an blauen und violetten Farben fordert, um auf gleiche Höhe mit dem normalen Auge (mit ungefärbter Linse) zu kommen. Daß die Absorption in der Linse mit Rücksicht auf die blauen und violetten Strahlen im Verhältnis zur Absorption in Rot sehr bedeutend werden kann, ist aus den Versuchen zu ersehen, die König mit der Linse eines 55 jährigen Mannes angestellt hat.[2]) König kam

---

[1]) Unter „retinaler Energie" verstehen wir hier die Energie, die zur Netzhaut hineingelangt, im Gegensatze zur „physischen Energie", d. h. der Energie, die die Hornhaut des Auges trifft.

[2]) Sitzungsber. d. Berliner Akademie 1894, Bd. 2, p. 585.

hierdurch zu den in Tabelle II angeführten Koeffizienten. Diese Koeffizienten, die Durchlässigkeitskoeffizienten (*L*), geben das Verhältnis zwischen den Lichtmengen, die bei Strahlen von verschiedener Brechbarkeit durch die Linse gehen. Wie man aus dieser Tabelle sehen wird, ist die Absorption in Violett bedeutend größer als die in Rot, und der Unterschied zwischen der Absorption der blauvioletten und der roten Strahlen kann vielleicht noch größer werden, da wir ja keine Garantie dafür haben, daß Königs Zahlen gerade an der Maximalgrenze für Absorption in der Linse liegen.[1])

Tabelle II.

$\lambda =$	655	631	619	610	600	590	580	570	560	550	540	530
$L =$	0,976	0,950	0,930	0,912	0,897	0,882	0,855	0,832	0,802	0,781	0,750	0,710
$\lambda =$	520	510	500	490	480	474	464	454	448	437	420	
$L =$	0,680	0,640	0,600	0,550	0,505	0,474	0,421	0,365	0,330	0,255	0,120	

Die Vorsicht verlangt daher, bis auf weiteres von Farbenversuchen bei Personen, die ziemlich viel über 40 Jahre alt sind, soviel als möglich abzusehen, vorausgesetzt, daß man keine Gewißheit dafür schaffen kann, daß normale Farbenauffassung vorhanden ist. — Die verhältnismäßig starke elektive Absorption, die in der Linse stattfinden kann, ist übrigens ein Phänomen, auf das die Maler aufmerksam sein sollten. Sie werden gleichwie andere Menschen in höherem Alter oft, ja wohl immer die Farben mehr gelblich als normal sehen, ohne daß sonst die Sehschärfe vermindert zu sein braucht. Liebreich hat speziell die Bedeutung studiert, die die Absorption in der Linse für die Malkunst haben kann[2]). Man kann sich, sagt er, eine Vorstellung davon machen, wie Menschen mit gelber Linse die Farben sehen, wenn man ein gelbes Glas vor seine Augen hält. Hat man sich etwas an dieses Glas gewöhnt, so sieht man alles nicht gelblich wie am Anfang, sondern die Dinge scheinen ihre natürliche Farbe zu haben, da das Auge für gelbes Licht geschwächt ist. Eine genaue Untersuchung zeigt jedoch, daß alle schwachblauen Farben gar nicht gesehen werden können, da

---

[1]) Auch wenn die Linse zuweilen mehr oder weniger gelb sein kann, als die von König untersuchte, ist es doch möglich, daß das Verhältnis zwischen den Durchlässigkeitskoeffizienten unverändert bleiben kann. Dies wird der Fall sein, wenn die mehr oder minder ausgeprägte gelbe Farbe der Linse darauf beruht, daß eine bald dickere bald dünnere Schicht desselben gelben Farbstoffs abgelagert wird. Die relative Absorption wird dann ganz unverändert bleiben.

[2]) Siehe das Referat in Nature 1872, p. 404. Die Originalabhandlung (Die Fehler des Auges bei Malern. Der Naturforscher, Nr. 47, 1872) war mir nicht zugänglich.

das gelbe Glas sie absorbiert. Dies hat bei Naturbetrachtung keine sonderliche Bedeutung, da es nur verhältnismäßig schwache blaue Farben sind, die absorbiert werden, aber für das Malen ist es anders. Hier arbeitet man mit einer viel lichtschwächeren Farbenskala als die, welche wir in der Natur sehen, und wenn man ein Gemälde durch ein gelbes Glas betrachtet, wird man daher in der Regel mehrere Stellen finden, wo die blauen Farben so schwach sind, daß sie von dem gelben Glas absorbiert werden. Selbst die intensivste blaue Farbe, die der Maler auf seiner Palette hat, wird vom Glase bedeutend geschwächt. An Gemälden, die gemalt sind, nachdem der Maler das fünfzigste Jahr überschritten hat, kann man diese Wirkung oft sehen. Ein Beispiel hierfür ist — nach Liebreich — Mulready. Man behauptete, daß Mulready, als er älter wurde, „too purple" malte. Eine genauere Untersuchung zeigt indessen, daß das Eigentümliche an seinen späteren Arbeiten das ist, daß er zuviel Blau gebraucht hat. Sieht man Mulreadys spätere Gemälde durch ein gelbes Glas an, so verschwinden diese Fehler; was früher unnatürlich schien, wird verbessert; z. B. wird eine zu violette Gesichtsfarbe nun natürlich rot. Der Künstler hätte viele dieser Fehler vermeiden können, wenn er ein blaues Glas vor seine Augen gehalten hätte.

In der Hornhaut, in der Wasserflüssigkeit und im Glaskörper werden, wie gesagt, alle Strahlen des sichtbaren Spektrums fast gleichmäßig absorbiert, und da man wenigstens mit einiger Sicherheit es unterlassen kann, auf elektive Absorption in der Linse Rücksicht zu nehmen, so lange man nur Versuche benutzt, die von jüngeren Personen angestellt sind, könnte es ganz unnötig erscheinen, sich um die Absorption im Auge zu kümmern. Dies ist doch nicht der Fall; denn auf der Netzhaut selbst, aber vor deren lichtperzipierender Schicht, findet man bei allen Menschen (selbst bei Totalfarbenblinden) und auf allen Altersstufen den sog. gelben Fleck, Macula lutea. Macula lutea hat auf der Netzhaut eine Größe von mindestens 3 mm im Durchmesser, und die Lichtstrahlen werden hier verschieden, je nach ihrer Wellenlänge, absorbiert, so daß, wenn zwei gleich große Lichtmengen von verschiedener Wellenlänge den gelben Fleck treffen, sie nicht mehr gleich groß sein werden, wenn sie diesen passiert haben. Es ist deshalb sehr notwendig, die Absorption im gelben Fleck zu kennen, und sie ist auch mehrmals und auf verschiedene Weise bestimmt worden.

Der Physiker P. Glan hat das Verdienst, zuerst die Lösung dieser Aufgabe versucht zu haben[1]), aber seine Resultate sind

[1]) Pflügers Archiv Bd. 39, 1886, p. 53—62

übrigens verfehlt. Glan bestimmte nämlich die Absorption im gelben Fleck, indem er durch farbige Gläser zwei gleich helle Kerzen betrachtete, die eine Flamme direkt, die andere extramakulär unter einem Winkel von ungefähr 20° und dann die eine Kerze so lange näherte oder entfernte, bis ihm beide Flammen gleich hell schienen. Er vermeinte so die Maculaabsorption aus dem Abstand der Lichter vom Auge und aus dem Winkel, unter dem ihr Licht das Auge traf, bestimmen zu können. Dies führt indessen — ganz abgesehen von der Genauigkeit, womit man auf diese Weise experimentieren kann — nicht zu brauchbaren Resultaten, weil Glan stillschweigend von der fehlerhaften Voraussetzung ausging, daß die Struktur der Netzhaut dieselbe ist, unmittelbar hinter der Macula und außerhalb dieser. Die Anatomen haben längst gewußt, daß dies nicht der Fall ist. Es gibt eine verschiedene Verteilung der lichtperzipierenden Elemente, Stäbchen und Zapfen, hinter und außer der Macula und deshalb auch eine etwas abweichende Farbenauffassung.

Glans Versuch, die Absorption im gelben Flecke zu bestimmen, gelang also nicht. Einige Jahre nachher bestimmte indessen einer von Prof. Herings Assistenten, Dr. Moritz Sachs, die Absorption in der Macula[1]) mit hinreichender Genauigkeit. Sachs benutzte nach Herings Vorschlag eine direktere Methode als die, welche Glan angewandt hatte. Vom pathologisch-anatomischen Institut in Wien erhielt Sachs mehrere Maculae, die kurz nach dem Tode ausgeschnitten waren[2]). Diese Maculae wurden nun vor den einen Spalt in einem Spektroskop gestellt, und die Absorption in der Macula machte sich in der Weise geltend, daß die eine Hälfte des Gesichtsfeldes (die, welche ihr Licht vom Spalte erhielt, vor dem eine Macula angebracht war) etwas dunkler schien als die andere Hälfte des Gesichtsfeldes, die vom andern Spalte beleuchtet wurde, der frei war. Die Verdunkelung fand ganz überwiegend an dem blauen Ende des Spektrums statt. Da man im voraus dafür gesorgt hatte, daß die zwei Hälften des Gesichtsfeldes gleich hell waren, bevor die Macula vor den einen Spalt gesetzt wurde, konnte man jetzt ein Maß für die Größe der Absorption im gelben Fleck erhalten, indem man den Spalt, vor dem eine Macula angebracht war, unverändert ließ und dann notierte, um wieviel man den andern Spalt bei den verschiedenen Farben vermindern mußte, damit beide

---

[1]) Pflügers Archiv, Bd. 50, 1891, p. 574—587. Sachs scheint Glans Abhandlung nicht gekannt zu haben; wenigstens spricht er nicht davon.

[2]) In Graefe-Saemisch' Handbuch usw., Aufl. II, p. 75, schreibt Greff folgendes: „Wir finden .... an der Stelle des schärfsten Sehens .... einen gelben Farbstoff, der alle Schichten der Retina durchsetzt und sich auch noch lange post mortem erhält."

Hälften des Gesichtsfeldes wieder gleich hell erscheinen konnten. Indem er auf diese Weise vorging, kam Sachs zu den in Tabelle III angeführten Werten für 9 verschiedene Maculae[1]). „Schon mit bloßen Augen", sagt Sachs, „konnte man sehen, daß es ganz bedeutende Unterschiede zwischen den Maculae von verschiedenen Menschen gebe, indem einige mehr, andere weniger gelblich seien." Betrachtet man indessen die Tabelle von Sachs, in welcher alle neun Versuchsreihen bei der Frauenhoferschen Linie *D* auf denselben Wert (10) gebracht sind, sieht man, daß — trotz der von Sachs bei den verschiedenen Menschen in der Maculapigmentierung hervorgehobenen Verschiedenheit — keine sichere Abweichung unter den relativen Absorptionszahlen konstatiert werden kann. Es scheint also, daß hier nur von quantitativen, nicht aber von qualitativen individuellen

Tabelle III.

λ	1	2	3	4	5	6	7	8	9
589	10	10	10	10	10	10	10	10	10
560	9,66	9,56	—	—	—	—	—	—	—
532,8	—	9.16	—	—	—	9,42	—	—	—
526,9	9.36	8,90	9,80	9.00	9,59	9,17	9,30	9.16	9,13
518,3	9,20	8,26	—	—	9,36	9,17	9,16	9.16	8,90
515	—	7,90	9,23	—	—	—	8,73	8,66	8,83
510	8,76	7,03	—	—	—	—	—	8,03	8,10
505	7,76	6,56	—	—	—	—	—	7.71	7.43
500	7.73	6.53	7,43	—	8,50	7,61	7.93	7.57	—
495	—	6,10	—	—	—	—	—	—	—
486,1	6,86	6,60	7,06	6,56	7,85	7.39	7.73	—	6,66
466,6	—	5,73	—	—	—	7,23	—	—	—
438,4	—	5.73	—	6,40	7,60	6,85	—	—	—
422,6	6,50	5,10	6,56	—	—	—	—	—	—

Differenzen die Rede sein kann, d. h., hier findet bald eine dickere, bald eine dünnere Ablagerung von demselben gelben Pigment statt. Vorläufig muß man hiervon ausgehen, ganz sicher ist es aber übrigens nicht. In Zeitschr. usw. Bd. 5, 1893, p. 184 schreibt Ebbinghaus nämlich folgendes: „Leider konnte er (sc. Sachs) hierbei die Netzhäute nicht unterschiedslos benutzen, wie sie ihm zu Händen kamen, sondern nach einer mir von Hrn. Hering gemachten brieflichen Mitteilung konnte er nur ‚besser pigmentierte' Maculae verwenden. Dadurch bleibt es unbestimmt, wieweit die nachweisbaren Verschiedenheiten in der Absorption verschiedener Maculae eigentlich gehen." —

[1]) Breuer fand eine gute Übereinstimmung mit Sachs' Resultaten, indem er eine ganz andere Methode benutzte. Seine Versuche sind jedoch unvollständig, insofern er die Maculaabsorption nur an ein paar Stellen im Spektrum untersucht hat. Es ist indessen bemerkenswert, daß Sachs' Resultate, wenigstens in Betreff einiger Farben, auf anderem Wege bekräftigt worden sind. (Siehe Zeitschr. für Psychol. und Physiol. d. Sinnesorgane, Bd. 13, 1897, p. 464—474.)

Müssen wir auch unterdessen vorläufig davon ausgehen, daß die Verschiedenheiten in der Maculapigmentierung nur quantitativ sind, leuchtet es doch ein, daß diese Verschiedenheiten mehrere der individuellen Abweichungen, die man bei Personen normaler Farbenauffassung findet, hinreichend erklären können. Es kann wohl keinem Zweifel unterliegen, daß die Heringsche Schule bisweilen die Bedeutung übertrieben hat, welche die verschiedene Maculapigmentierung haben kann, indem man von dieser Seite geneigt war, viele individuellen Verschiedenheiten in der Farbenauffassung bei Normalen — wie auch mehrere bei Farbenblinden — durch eine Hinweisung auf verschiedene Absorption in der Macula zu erklären. Ist dieses auch übertrieben, so kann es doch andererseits nicht geleugnet werden, daß mehrere individuelle Differenzen

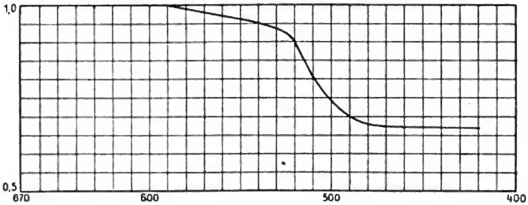


Fig. II.

hierdurch erklärbar werden. Das haben übrigens sowohl Max Schultze[1]) und Maxwell[2]), als später v. Kries und Frey[3]), auf indirekte Versuche gestützt, für wahrscheinlich gehalten, während Hering der erste ist, der es **direkt** nachgewiesen hat, indem er „relativ blausichtige Versuchspersonen" durch eine passend gewählte Macula sehen ließ und dadurch erreichte, daß sie jetzt in ihren Angaben mit den „relativ gelbsichtigen" übereinstimmten. Die Verschiedenheit in der Maculapigmentierung kann nach Hering so groß werden, daß dieselbe Mischung von Spektralgrüngelb und Spektralgrünblau, die einer rein grün findet, dem anderen blaugrün und dem dritten gelbgrün erscheinen kann. — Nimmt man, was nach dem vorhergehenden sich wohl verteidigen läßt, die Mittelzahl von Sachs' Versuchen, so erhält man eine Kurve wie Figur II (siehe auch Tabelle IV). Daraus ersieht man, daß die Absorption zwischen den Fraunhoferschen Linien *D* und *E* lang-

[1]) Über den gelben Fleck der Retina 1866.
[2]) Philosophical Transactions 1860, Bd. 150.
[3]) Du Bois-Reymonds Archiv 1881.

sam steigt und darauf bis *F* schnell wächst. Von hier bis *G* bleibt sie fast unverändert[1]). Die Behauptung von Helmholtz, daß die Maculaabsorption nur Bedeutung für die Strahlen um *F* hat, läßt sich also nach den Versuchen von Sachs nicht länger verteidigen; die Absorption kann fast ganz bis *D* gemessen werden. Jenseits *D* ist keine Absorption oder jedenfalls keine meßbare.

Das Ergebnis der hier diskutierten Absorption in den Augenmedien und dem gelben Flecke ist also, daß man, weil nur in der Macula (auf allen Altersstufen) elektive Absorption stattfindet, sich damit begnügen kann, die Absorption in der Macula zu berücksichtigen, solange man mit relativer Energie zu tun hat.

Tabelle IV.

$\lambda =$	670	625	590	580	575	570	560	555	550	540	535	530	520	510
$M =$	1	1	1	0,991	0,986	0,981	0,971	0,966	0,962	0,951	0,946	0,941	0,905	0,800
$\lambda =$	505	500	490	480	474	470	464	454	450	448	437	430	420	
$M =$	0,770	0,740	0,700	0,680	0,677	0,675	0,672	0,670	0,670	0,670	0,670	0,670	0,670	

Eine für die praktische Seite der Wissenschaft unwesentliche, für die theoretische Seite um so viel wichtigere Frage wollen wir in diesem Zusammenhange berühren. Man hat gemeint, daß die Grenzen des sichtbaren Spektrums durch die Absorption in den Augenmedien bestimmt werden, da es ja einleuchtend ist, daß wir nichts außerhalb der Grenzen des Spektrums sehen, wenn alle oder die meisten der Strahlen durch die Augenmedien hier absorbiert werden. Diese Erklärung ist doch ganz unrichtig. Was Ultraviolett betrifft, hat man ja schon lange eingesehen, daß solche Strahlen die Netzhaut erreichen und dieselbe beeinflussen können, da sie sonst nicht durch hinreichende Adaptation sichtbar werden können.

Was Ultrarot betrifft, ist die Sache weniger klar gewesen. Man hat hier nicht a priori entscheiden können, ob die Unsichtbarkeit der ultraroten Strahlen von totaler Absorption in den Augenmedien herrührt, oder ob sie vielleicht durch die Unempfänglichkeit der Netzhaut für diese Strahlen bedingt ist. So-

[1]) König, der übrigens selbst die Mittelzahl von Sachs' Observationen benutzt, meint, daß die Absorption mit dem Steigen auch ein wenig jenseits *F* fortfahren muß. Hierüber sagt er folgendes: „insbesondere möchte ich es für unwahrscheinlich halten, daß, wie Hr. M. Sachs gefunden hat, die Absorption in der Macula von der Wellenlänge 460 $\mu\mu$ bis zum violletten Ende nicht mehr zunimmt; mir ist kein gelbgefärbtes Pigment bekannt, welches einen solchen Verlauf der Absorption zeigte". (Siehe Sitzungsber. d. Berliner Akad. 1894, Bd. II, p. 585.)

wohl Brücke als auch Helmholtz haben den Augenmedien die Schuld zugeschrieben; dies wurde von Franz bekämpft, und 1895 entschied E. Aschkinas[1]) die Frage, indem er durch eine — wie es mir scheint. nicht sehr beachtete — bolometrische Untersuchung dartat, daß die Absorption bei $\lambda = 670$ nur ein Prozent ausmacht, und daß sie von da langsam steigt, je weiter wir ins Ultrarote kommen, um erst bei $\lambda = 1400$ total zu werden (siehe Tabelle V). Daraus folgt, daß die Absorption in den Augenmedien an der Unsichtbarkeit der ultraroten Strahlen nicht schuld sein kann.

Tabelle V.

(A = die Absorption in Prozenten.)

λ	A	λ	A	λ	A
670	1	850	8	1063	36
690	1	872	10,5	1095	34,5
710	2,5	890	12	1127	48,5
730	5	912	16,5	1162	82
750	6	935	24	1205	93
770	6,5	958	43	1252	94
790	5	980	60	1300	93,5
810	5	1008	60,5	1350	97,5
830	8	1035	47,5	1400	100

Die Schwellenwerte und deren Abhängigkeit von den physiologisch-anatomischen Verhältnissen in der Netzhaut.

§ 1.

Die neutralen Schwellenwerte.

Unter der Voraussetzung, daß wir nur solche Farbenuntersuchungen berücksichtigen, bei welchen man dafür gesorgt hat, daß die Erweiterung der Pupille keine Rolle spielen kann[2]), können wir uns jetzt von den Energien, die in einem bestimmten Fall die Netzhaut beeinflussen — welche wir immer die „retinalen Energien“ benennen wollen — ein ziemlich zuverlässiges Wissen verschaffen. Die erste Frage, welche wir beantworten müssen, wird natürlich diese sein: Was wird aus den Lichtenergien, die die Netzhaut treffen? Werden gleich großen retinalen Energien gleich helle Farbenempfindungen entsprechen, oder wie verhält sich die Sache

[1]) Wied. Ann. Bd. 55.

[2]) Das ist eine Notwendigkeit, da der Diameter der Pupille bei der stärksten Beleuchtung fast zehnmal kleiner als bei der schwächsten werden kann.

hier? Um den einfachsten Fall zuerst zu betrachten, fangen wir damit an, die retinalen Energien an der Schwelle zu untersuchen, wo alle Farben — rot ausgenommen — ihre spektrale Qualität eingebüßt haben und uns dunkel gräulich (neutral) erscheinen. Wir nehmen hier unseren Ausgangspunkt von der vorläufig unbewiesenen, wohl aber ganz wahrscheinlichen Voraussetzung, daß alle eben merkbaren Neutralfarben an der Schwelle gleich hell, äquiluzid sind. Daß diese Farben gleich hell sind, hat man oft als ganz selbstverständlich betrachtet; so schreibt z. B. König[1]): „Es ist ersichtlich, daß man die eben merkliche Helligkeit als eine bestimmte Helligkeitsstufe auffassen kann .... das, was man eben wahrnehmen kann, hat stets dieselbe Helligkeit, gleichviel, von welchem Licht der Reiz ausgeübt wird." König hat übrigens, wie wir später sehen werden, durch seine eigenen Experimente den Beweis der Richtigkeit dieser Behauptung gegeben.

Wir setzen also voraus, daß alle eben merkbaren Farben an der Schwelle gleich hell sind, und versuchen dann die Frage zu beantworten: Mit wie großen (relativen) Energien müssen Strahlen verschiedener Brechbarkeit die Netzhaut treffen, damit wir eben eine Minimalempfindung erhalten können? Die einfachste Antwort dieser Frage scheint unleugbar, daß gleich große retinale Energien gefordert werden, wenn die einzelnen Farben eben über die Schwelle treten können. Der Sachverhalt ist indessen nicht ein solcher — weshalb, werden wir später sehen. Selbst durch eine unvollkommenere Kenntnis von den retinalen Energien als diejenige, die wir jetzt vermittelst der vorhergehenden Untersuchungen uns verschaffen können, hat man konstatieren können, daß unsere Netzhaut von sehr verschiedenen Energiegrößen beeinflußt werden muß, damit wir bei Strahlen verschiedener Brechbarkeit die erste schwache Spur von (neutraler) Farbe sehen können.

Man hat verschiedene Versuche angestellt, um das Verhältnis zwischen den retinalen Energien, die hier wirksam sind, zu bestimmen; die genaueste aber, ja vielleicht die einzige wirklich genaue Bestimmung dieses Verhältnisses hat doch König gemacht.[2]) Dieser hat eine besonders gute Untersuchung der retinalen Energien an der Schwelle vorgenommen, wiewohl seine Endresultate etwas verschoben werden, weil er seine Berechnungen mit der vorhergenannten, etwas unvollkommenen Energiekurve vorgenommen hat (siehe Tabelle I, Kolonne 13). Nehmen wir deshalb die Untersuchungen von König wieder auf.

[1]) Helligkeitswerte der Spektralfarben, 1891, p. 56.
[2]) Helligkeitswerte usw., p. 58.

Es ist hierbei möglich, den wesentlichsten Teil der Arbeit, die König gemacht hat, zu benutzen; seine direkt gefundenen Resultate, d. h. seine Bestimmungen der für verschiedene Farben verschiedenen Größe, die er dem Spalt des benutzten Spektralapparats geben mußte, um eine eben merkbare Empfindung zu erhalten, sind, wie alle Versuche dieses Forschers, besonders zuverlässig. Es sind nur Königs unvollkommene Energiekurven, welche die Umrechnung von Spaltbreite zu Energie und damit auch Königs endliche Resultate weniger korrekt machen. Da ich sehr bezweifelte, daß es mir möglich sei, die genannte direkte Bestimmung mit ebenso großer, geschweige größerer Genauigkeit als König vorzunehmen, welcher ja einen vorzüglichen Spektralapparat benutzte und übrigens eine phänomenale Übung im Vornehmen solcher Experimente hatte, hielt ich es nicht nur für das Leichteste, sondern auch für das Sicherste, von den Königschen Versuchen auszugehen und nur die Umrechnung von Spaltbreite zu Energie vorzunehmen, ausgehend von der vollkommenen Kenntnis, die die Messungen von K. Ångström uns gegeben haben. König experimentierte auf die Weise, daß er, nachdem er hinreichend adaptiert hatte, die Lichtstärke der verschiedenen Farben verkleinerte, bis er eine Minimalempfindung erreichte.

Tabelle VI.

λ	1 S	2 E_λ	3 $\frac{S}{E_\lambda}$	4 M	5 $\frac{S}{E_\lambda \cdot M}$	6 ausgeglichen	7 P_n
670	0,00338	1,02	0,0033	1	0,0033	0,0033	0,0004
650	0,00561	0,82	0,0068	1	0,0068	0,016	0,002
625	0,0288	0,61	0,047	1	0,047	0,11	0,012
605	0,0825	0,47	0,18	1	0,18	0,31	0,034
590	0,177	0,38	0,47	1	0,47	0,84	0,092
575	0,362	0,31	1,17	0,99	1,18	1,99	0,22
555	0,713	0,22	3,24	0,97	3,34	3,84	0,42
535	1,000	0,16	6,25	0,95	6,58	6,14	0,68
520	0,934	0,12	7,78	0,91	8,55	8,16	0,90
505	0,650	0,08	8,13	0,77	10,56	9,10	1,00
490	0,427	0,06	7,12	0,70	10,17	8,36	0,92
470	0,167	0,04	4,18	0,67	6,24	6,22	0,68
450	0,0521	0,03	1,74	0,67	2,60	3,14	0,35
430	0,00760	0,01	0,76	0,67	1,13	1,13	0,12

In Tabelle VI, Kolonne 1, ist eine Reihe von Zahlen (S-Werte) angeführt, welche die reziproken Werte der Breite angibt, die König bei diesen Versuchen dem Spalt geben mußte, um eine eben merkbare Farbe an verschiedenen Stellen im Spektrum zu erhalten. Wir ziehen es vor, nicht mit den Spaltbreiten, sondern gleich mit ihren reziproken Werten zu rechnen; es leuchtet näm-

lich ein, daß, je größer die Breite ist, die man dem Spalt eines Spektralapparats geben muß, um eine Minimalempfindung zu erhalten, desto kleiner ist die Größe, für die wir uns interessieren, nämlich die Reizempfindlichkeit. Die reziproken Werte von Königs Spaltbreiten — die S-Werte — geben also die Reizempfindlichkeit des Auges an der Schwelle im gegebenen Spektrum an. Um nun die Reizempfindlichkeit unabhängig von dem Spektrum, womit man gearbeitet hat, auszudrücken, müssen wir die gefundenen Werte für S in Energie umrechnen. Das kann auf folgende Weise ausgeführt werden: König hat mit einem Dispersionsspektrum gearbeitet und als Lichtquell einen Gastriplexbrenner benutzt; will man seine Quantitätsangaben in Energie umrechnen, muß man deshalb — da die lebendige Kraft gerade proportional mit der Spaltbreite und mithin umgekehrt proportional mit S ist — S mit E_h dividieren, wo E_h die Energie im Dispersionsspektrum des Hefnerlichtes ist. Wir können nämlich, wie früher gesagt, die Energiekurven des Hefnerlichtes überall benutzen, wo mit gewöhnlichem Gaslicht, Petroleumlicht und vielleicht auch mit elektrischem Glühlicht gearbeitet worden ist. In Tabelle VI, Kolonne 2, sind die Werte von E_h[1]) und in Kolonne 3 der Wert von $\frac{S}{E_h}$ angegeben. Kolonne 3 gibt uns doch keine hinreichende Aufklärung dessen, was wir suchen: die reziproken Werte der Energie, womit Strahlen verschiedener Brechbarkeit die Netzhaut treffen müssen, um uns eine Minimalempfindung zu verschaffen; wir müssen, um Kenntnis davon zu erhalten, auch die elektive Absorption in der Macula lutea berücksichtigen. Der Durchlässigkeitskoeffizient für Macula, M, ist in Kolonne 4 angegeben (vgl. Tabelle IV), und wenn wir $\frac{S}{E_h}$ mit M dividieren, erhalten wir die reziproken Werte der gesuchten retinalen Energien an der Schwelle; diese Werte sind in Kolonne 5 angeführt. (Wir müssen hier dividieren; denn je mehr Licht durch die Macula geht, also je größer M ist, desto größer wird auch der Bruchteil sein, den die Retina von E_h, d. h. von der Lichtmenge, die die Hornhaut des Auges trifft, empfängt.) Da Kolonne 5 uns keine vollständig glatte Kurve gibt, was aber bei so schwierigen Versuchen auch nicht zu erwarten wäre, sind die Werte in Kolonne 5 durch eine einfache Interpolationsformel ausgeglichen worden. Man erlangt dadurch die Zahlen in Kolonne 6. Die benutzte Ausgleichungsformel war die folgende:

[1]) Vgl. Tabelle I, Kolonne 1.

$C = \frac{a + 2b + 3c + 2d + e}{9}$, wo *a*, *b*, *c*, *d* und *e* 5 nach einander in Kolonne 5 folgende Zahlen bezeichnen, und *C* den durch die rechte Seite der Gleichung gefundenen Wert für das mittlere Glied (*c*) angibt. Am Anfang und am Schluß der Kolonne 5 wurde die vereinfachte Formel $B = \frac{a + 2b + c}{4}$ benutzt; *B* gibt hier den durch die rechte Seite dieser Gleichung gefundenen Wert des mittleren Gliedes *(b)* an. — In Kolonne 7 sind die Werte von Kolonne 6 in der Art umgerechnet, daß der maximale Wert (hier bei $\lambda = 505$)

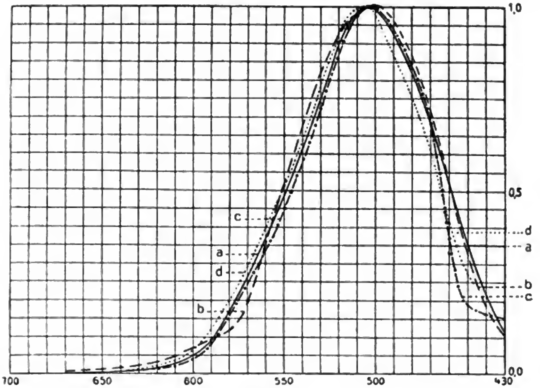


Fig. III.

a) Kurve für die Reizempfindlichkeit der Normalen; b) Kurve für die Sehpurpurabsorption; c) Kurve für die Reizempfindlichkeit der Rotblinden; d) Kurve für die Reizempfindlichkeit eines Totalfarbenblinden.

als eins gesetzt wurde. Das geschah mit Rücksicht auf eine Vergleichung mit Versuchen, die im folgenden erwähnt werden sollen. Fig. IIIa, die nach Kolonne 7, Tabelle VI, gezeichnet ist, zeigt also die reziproken Werte derjenigen Energie, die gefordert werden muß, damit wir gerade eine Farbenempfindung an der Schwelle bekommen können. Kurve a, Fig. III, ist also eine Kurve für die Reizempfindlichkeit der Retina, vom benutzten Spektrum unabhängig, welche Größe wir P_n nennen wollen (die Reizempfindlichkeit für neutrale Farben). — Aus dieser Kurve sowohl als aus Kolonne 7, Tabelle VI, sieht man, daß die Reizempfindlichkeit hier die größte, beinahe an $\lambda = 500$, ist und gegen die Grenzen des Spektrums ab-

nimmt — meist doch gegen das am wenigsten brechbare Ende des Spektrums. —

Daß eine große Verschiedenheit der Reizempfindlichkeit der Retina für verschiedene Farben stattfindet, weiß man schon lange. Langley[1]) hat z. B. durch eine andere Methode als die hier benutzte eine experimentale Bestimmung davon zu geben versucht. Er bestimmte nicht das Verhältnis zwischen den reziproken Werten derjenigen Energien, die hier dem Auge eine Minimalempfindung verschaffen, also nicht die relativen Werte von P_n, sondern er suchte das mechanische Äquivalent zu finden für die Energien, die angewandt werden müssen, damit wir eine Minimalempfindung bekommen. Das ist sehr schwierig, und Langley meint auch, daß Fehler von ca. 100% bei seinen Untersuchungen begangen sein können. Muß man auch darauf rechnen, daß sich so bedeutende Fehler einschleichen können, so sind doch die Messungen von Langley sehr interessant, da man dadurch eine Vorstellung von der Empfindlichkeit des Auges für Energieeinwirkung bekommt. Langley fand, daß man mittelst derjenigen Energie, die benutzt wird, um uns eine eben merkbare Empfindung mitten im Spektrum zu verschaffen, nur ein Fünfunddreißigstel eines Milligramms ein Milliontel eines Millimeters ($^1/_{35}\, m\, g\, \mu\, \mu$) heben kann. Dies gilt von dem mittleren Teil des Spektrums, wo die Reizempfindlichkeit, wie wir gesehen, die größte ist; geht man aber gegen violett oder rot, so wird nach den Versuchen von Langley eine Energie gefordert, die ca. 200mal so groß als diejenige ist, die nötig war, um uns eine Minimalempfindung mitten im Spektrum zu verschaffen. Die Versuche, die Langley angestellt hat, gehen, was die relativen Werte betrifft, fast in derselben Richtung wie die von König, die wir umgerechnet haben; sie können sich doch nicht damit messen, da die Fehler, wenn man absolute Werte haben will, nach der eigenen Angabe von Langley zu groß sind. Übrigens hat Langley unterlassen, den Einfluß zu berücksichtigen, den die elektive Absorption in der Macula zweifelsohne hat. —

Ein anderer Schriftsteller, H. Eberth[2]), der fast gleichzeitig mit Langley die relative Reizempfindlichkeit an der Schwelle untersucht hat, berücksichtigt auch nicht die Maculaabsorption. Eberths Resultate können — obgleich er selbst sie als so wesentliche betrachtet, daß er seine Priorität Langley gegenüber zu behaupten versucht hat — als ein wohl sehr verdienstvoller, aber doch nur vorläufiger Versuch betrachtet werden; er bricht schon

---

[1]) Energy and Vision. American Journal of Science 3 Series. 1888. Vol. 35—36, p. 359 f.

[2]) Wied. Ann. 1888. Bd. 33, p. 136—155.

bei $\lambda = 470$ seine Untersuchungen ab und hat überdies bei seinen Umrechnungen eine allzu ungenaue Energiekurve benutzt. — In der allerneuesten Zeit hat A. Pflüger[1]) einen Versuch gemacht, die Reizempfindlichkeit an der Schwelle mit größerer Genauigkeit als König zu bestimmen. Pflüger erreichte das Resultat, daß hier sehr bedeutende individuelle Abweichungen stattfinden, und daß man mit denselben Versuchspersonen zu verschiedener Zeit sehr verschiedene Resultate bekommt. Dies ist anderseits noch nicht bestätigt worden. Übrigens hat Pflüger, im Gegensatze zu dem, was gewöhnlich bei derartigen Untersuchungen der Fall zu sein pflegt, mit einer von ihm selbst bestimmten, sehr guten Energiekurve gerechnet (siehe Tabelle I, Kolonne 2). —

Der Unterschied, der sich für Strahlen verschiedener Brechbarkeit mit Rücksicht auf die Reizempfindlichkeit an der Schwelle (P_n) geltend macht, ist sowohl nach den von uns umgerechneten Versuchen von König als auch nach unvollkommeneren von anderen so bedeutend, daß es sehr wünschenswert erscheint, ihn näher zu erklären. Daß der Grund der genannten verschiedenen Reizempfindlichkeit in physiologisch-anatomischen Verhältnissen in der Netzhaut gesucht werden müsse, war im voraus ziemlich klar, es galt wesentlich, die physiologischen Prozesse nachzuweisen, die hier die entscheidende Rolle spielen.

Wir treffen hier bei den Versuchen der Lösung dieses Problems wieder den Namen Königs. König hat zuerst durch Experiment zu entscheiden versucht, ob nicht der Sehpurpur im menschlichen Auge die Ursache sein könne, daß man so verschiedene Werte von P_n an verschiedenen Stellen im Spektrum erhält. König, der hier nahe mit der Schule v. Kries übereinstimmt, fand dieses wahrscheinlich, da der Sehpurpur wesentliche Bedeutung bei der für schwaches Licht adaptierten Netzhaut hat. Nach der epochemachenden Entdeckung von Boll und den mehr speziellen Untersuchungen von Kühne wissen wir, daß die Außenglieder der Stäbchen — in der von Licht nicht beeinflußten oder schwach beeinflußten Retina — von einem Farbstoff, dem Sehpurpur, umgeben sind, welcher bei stärkerer Beleuchtung ganz oder fast ganz verschwindet. Deshalb ist es wahrscheinlich, daß der Sehpurpur eine sehr wesentliche Bedeutung für das Sehen in der Dämmerung hat, oder bei einer Beleuchtung, die so schwach ist, daß die Farben ihre spektrale Qualität verloren haben und — rot ausgenommen — dunkel graulich, neutral aussehen. Verhält sich dieses so, ist unsere Lichtempfindung in der Nähe des Schwellenwertes wirklich von der Funktion des Seh-

[1]) Drudes Ann. 1902, Bd. 9, p. 238—243.

purpurs abhängig, so kann man auch erwarten, daß die Absorptionskurve einer Sehpurpurauflösung dieselbe Form wie die Kurve der Reizempfindlichkeit an der Schwelle erhält (Fig. IIIa und Tabelle VI, Kol. 7).

Was den Gebrauch betrifft, den man hier von der Kurve für die Absorption im Sehpurpur machen kann, wird übrigens noch etwas zu erwägen sein. Da wir früher die Untersuchungen erwähnten, die angestellt worden sind, um die elektive Lichtabsorption in der Linse und dem gelben Flecke zu bestimmen, war es eigentlich nicht unser hauptsächliches Interesse, zu wissen, wie groß diese Absorption sei; das hatte nur sekundäre Bedeutung für uns als ein Mittel, den Durchlässigkeitskoeffizienten zu bestimmen, d. h., eine wie große Menge der verschiedenen Strahlen durch die Linse und die Macula lutea gehe, da es natürlich ausschließlich jenes Licht, das durchgeht, ist, das Bedeutung für Retina haben kann. — Was den Sehpurpur betrifft, verhält die Sache sich anders.[1]) Wenn wir den Sehpurpur untersuchen, haben wir nur Interesse für das Licht, welches dieser absorbiert, und nicht für das Licht, das durch den Purpur, also hinter die Stäbchen, hinter die lichtperzipierende Schichte, geht. Von einer solchen Betrachtung ausgehend suchte König eine Übereinstimmung zwischen der Absorptionskurve für den Sehpurpur und seiner Kurve für die Reizempfindlichkeit an der Schwelle. Kann es experimental bewiesen werden, daß diese zwei Kurven übereinstimmen, so hat man besonders guten Grund, die Absorption des Sehpurpurs als Ursache des für verschiedene Farben verschiedenen Wertes von P_n zu betrachten. Daß eine gewisse Übereinstimmung zwischen den zwei Kurven sein muß, vermutet man a priori nicht ohne Grund. Eine Auflösung des Sehpurpurs ist ja, wie der Name angibt, purpurrot; mithin kann Grund vorhanden sein, anzunehmen, daß der Sehpurpur vorzugsweise die mittleren Strahlen des Spektrums einsaugt. Das stimmt ganz gut damit überein, daß wir bei der Kurve für die Reizempfindlichkeit P_n das Maximum beinahe an $\lambda = 500$ liegen sehen. Solche Betrachtungen sind doch allzu unbestimmt, um daraus einen ganz sicheren Schluß zu ziehen, und es war deshalb eine sehr bedeutsame Aufgabe, die sich König stellte, als er selbst die Absorption im Sehpurpur des Menschen zu bestimmen suchte[2]), und später zwei seiner Mitarbeiter, Fräulein E. Köttgen und Herrn Abelsdorff[3]) eine Massenuntersuchung der Sehpurpurabsorption bei den Wirbeltieren anzustellen bewog.

---

[1]) Zeitschr. usw. 1896, Bd. 12, p. 161 f. (Köttgen und Abelsdorff).
[2]) Sitzungsber. d. Berliner Akad. 1894, Bd. 2, p. 577 f.
[3]) Zeitschr. usw. 1896, Bd. 12, p. 161 f.

Die Untersuchung der Sehpurpurabsorption im Menschenauge war an und für sich nicht besonders schwierig, da es sich zeigte, daß der Sehpurpur bei der Einwirkung des verhältnismäßig schwachen Lichtes, womit experimentiert wurde, nicht sehr erblaßte. Dessenungeachtet gelang es König nur, ein Resultat zu erreichen, das er selbst vorläufig nennt, weil das Material, das ihm zur Verfügung stand, so begrenzt wie nur möglich war — er konnte nämlich nur Sehpurpur von einem einzigen Auge bekommen. Deshalb ist es ein großes Glück, daß Königs Versuche mit dem Menschenauge durch die Köttgen-Abelsdorffschen Versuche suppliert worden sind. Bei ihren Versuchen, die Sehpurpurabsorption bei Wirbeltieren zu bestimmen, gelang es auch Köttgen und Abelsdorff festzustellen, daß der Sehpurpur erblaßt, ohne daß die relative Absorption verändert wird. Es geht deutlich aus diesen Versuchen hervor, daß der Sehpurpur, wenn er starker und verhältnismäßig dauerhafter Beleuchtung ausgesetzt wird, nur weniger und weniger konzentriert wird. Der Sehpurpur geht also nicht, wenn er erblaßt, in „Sehgelb" über, wie man früher gemeint hat. Wohl kann eine von Licht beeinflußte Sehpurpurauflösung bisweilen gelblich aussehen; wird sie aber spektrophotometrisch untersucht, so zeigt es sich doch, daß man dennoch mit einer weniger konzentrierten Auflösung desselben Farbstoffes zu tun habe. Das ist beachtenswert, da der Stoff „Sehgelb" eine gewisse Rolle in der Geschichte der Farbentheorie gespielt hat. Selbst König hat eine Theorie aufgestellt, die wesentlich auf den Unterschied zwischen Sehrot und Sehgelb basiert ist.

Königs vorläufige Versuchsreihe war hinreichend genau, um, nachdem Köttgen und Abelsdorff ihre Versuche über die Sehpurpurabsorption bei den Wirbeltieren abgeschlossen hatten, konstatieren zu können, daß der Sehpurpur im Menschenauge eine ganz ähnliche Absorption habe, wie der Sehpurpur bei den Säugetieren, die Köttgen und Abelsdorff untersucht haben. Hierdurch bekommen wir einen festeren Grund unter die Füße, da wir uns nicht länger auf eine einzelne Versuchsreihe zu stützen haben. König verglich indessen die von ihm selbst gefundene Kurve für die Absorption im menschlichen Sehpurpur mit seiner eigenen Kurve für die Reizempfindlichkeit an der Schwelle und fand ganz gute Übereinstimmung. Da Königs Kurve für P_n — wie früher gesagt — weniger genau ist, wird es zweckmäßig sein, Königs Kurve für P_n, wie er sie anführt, nicht zu benutzen; wir erreichen größere Genauigkeit, wenn wir die von uns umgerechnete Königsche Kurve für P_n (Tabelle VI, Kolonne 7, und Fig. IIIa) mit der Absorptionskurve für den Sehpurpur vergleichen. Was die letzte

Kurve betrifft, ziehen wir vor, Königs durch einen einzelnen Versuch gefundene Zahlen nicht zu benutzen, wohl aber die Köttgen-Abelsdorffsche durch Massenversuche gefundene Kurve für die Absorption im Sehpurpur der Säugetiere (siehe Fig. IIIb und Tabelle VII.) Vergleicht man die Kurven *a* und *b*, Fig. III, so sieht man, daß man besonders guten Grund hat, anzunehmen, daß es die Sehpurpurabsorption ist, die die für verschiedene Farben verschiedene Reizempfindlichkeit an der Schwelle bedingt. Die ganz unerheblichen, oft kaum unterscheidbaren Abweichungen zwischen den zwei Kurven geben uns eine bis an Gewißheit grenzende Wahrscheinlichkeit, daß die zwei Erscheinungen, die Reizempfindlichkeit an der Schwelle und die Sehpurpurabsorption, in Kausalitätszusammenhang stehen. Bei Königs früheren Versuchen, um dasselbe zu konstatieren, war die Übereinstimmung geringer; sie wurde aber doch insgemein als genügender Beweis seiner Behauptung betrachtet.

Tabelle VII.

$\lambda =$	700	680	660	640	620	600	580	560	540	520	500	480	460	440	420
Sehpurpur-absorption	0,016	0,007	0,004	0,019	0,029	0,071	0,120	0,377	0,665	0,920	1,00	0,866	0,521	0,180	0,020

Die Absorptionskurve für den Sehpurpur fällt indessen nicht nur mit der Kurve für P_n bei Normalsehenden zusammen; eine analoge Übereinstimmung macht sich, wir wir gleich sehen werden, auch geltend, sowohl was die Dichromaten als was die Totalfarbenblinden betrifft. — König hat die Reizempfindlichkeit an der Schwelle für einen Rotblinden mittels Spaltbreiten ausgedrückt.[1]) Er hat hier keine Umrechnung in retinale Energie vorgenommen; wir können aber — indem wir auf dieselbe Weise verfahren, wie wir getan haben, als wir in Tabelle VI von Kolonne 1 bis Kolonne 7 gingen — Königs direkte Resultate in retinale Energie übertragen. Man gelangt dadurch zu den in Tabelle VIII, Kolonne 3, und Fig. IIIc angeführten Werten von P_n für den von König untersuchten Rotblinden; um der Vergleichung willen sind außerdem in Tabelle VIII einige der früher gefundenen Resultate eingefügt. — Was die Grünblinden betrifft, finden sich, soweit mir bekannt, noch keine Bestimmungen ihrer Schwellenwerte. König[2]) und v. Kries[3]) haben indessen die Reizempfindlichkeit eines Grünblinden für gleich helle Farben in der Nähe der Schwelle bestimmt. Diejenigen Resultate, die man hierdurch erreicht, liegen, wenn wir

[1]) Helligkeitswerte p. 58.
[2]) Helligkeitswerte etc. p. 55.
[3]) Zeitschr. Bd. 12, 1896, p. 13.

sie in retinale Energie umrechnen, der für Normale und Rotblinde gemeinsamen Kurve für P_n sehr nahe, und es kann daher kaum einem Zweifel unterliegen, daß auch die Grünblinden an der Schwelle dieselbe Reizempfindlichkeit wie die Normalen und die Rotblinden haben.

Tabelle VIII.

λ	1 P_n für König a	2 Sehpurpur-absorption b	3 P_n für einen Rotblinden c	4 P für einen Totalfarben-blinden d
670	0,0004	0,005	0,00034	0,000062
650	0,002	0,010	0,0023	0,0015
625	0,012	0,020	0,010	0,018
605	0,034	0,060	0,030	0,050
590	0,092	0,080	0,087	0,120
575	0,22	0,16	0,21	0,25
555	0,42	0,41	0,39	0,46
535	0,68	0,74	0,64	0,72
520	0,90	0,92	0,87	0,93
505	1,00	1,00	1,00	1,00
490	0,92	0,96	0,93	0,86
470	0,68	0,71	0,71	0,60
450	0,35	0,31	0,18	0,27
430	0,12	0,09	0,15	0,13

Es ist jetzt im allgemeinen anerkannt, daß die Totalfarbenblinden bei allen Beleuchtungen das Lichtmaximum im Spektrum auf der Stelle fest liegen haben, wohin die Normalen und die Dichromaten es in der Dämmerung versetzt sehen (Hering). Diese Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Farbensystemen gab König die Idee, zu untersuchen, ob nicht die Kurve für die Reizempfindlichkeit der Totalfarbenblinden, P, auch mit der Kurve für die Sehpurpurabsorption zusammenfalle. Unter der Reizempfindlichkeit versteht man hier die reziproken Werte derjenigen Energie, die die Netzhaut treffen muß, wenn ein Totalfarbenblinder bei einer mittelstarken Beleuchtung die Farben des Spektrums gleich hell sehen soll. Man zieht es vor, mit einer mittelstarken Beleuchtung zu arbeiten, da es hier gleichgültig ist, bei welcher Beleuchtung man P bestimmt. Die Totalfarbenblinden sehen nämlich bei allen Beleuchtungen das Spektrum mit derselben relativen Lichtverteilung (kein Purkinjesches Phänomen). Königs Versuch zeigte, es sei eine ganz gute Übereinstimmung zwischen der Reizempfindlichkeit für Totalfarbenblinde und der Absorptionskurve für den Sehpurpur, doch nur vorausgesetzt, es befinde sich eine bedeutende elektive Absorption in der von ihm untersuchten Linse eines Totalfarbenblinden (ca. 50 jährigen). Wir wollen wie gewöhnlich Königs Angaben der benutzten Spaltbreiten in retinale Energie umrechnen um zu sehen, wie groß die Übereinstimmung

wird, wenn man von einer genaueren Kenntnis der Energieverhältnisse ausgeht. Es ist, wie bei König, Rücksicht auf die elektive Absorption in der Linse genommen, indem wir auch Tabelle II bei den Umrechnungen benutzt haben. Die Resultate sind in Tabelle VIII, Kolonne 4 und Fig. IIId angegeben. Vergleicht man diese Bestimmungen mit den Bestimmungen für die Absorption im Sehpurpur, so sieht man, daß zweifelsohne eine wesentliche Übereinstimmung stattfindet, wenn sie auch nicht so auffällig ist als bei den Normalsehenden. Das läßt sich leicht erklären, da immer mehr Unsicherheit vorhanden sein muß, sobald man genötigt ist, die für verschiedene Altersstufen verschiedene Absorption in der Linse zu berücksichtigen. Die Abweichungen zwischen den zwei Kurven sind auch absolut die größten bei den blauen Farben, d. h. bei den Farben, die vorzugsweise von einer gelblichen Linse absorbiert werden können.

Dies alles scheint anzudeuten, daß die von Sehpurpur umgebenen Stäbchen ihre wesentliche Bedeutung als eine physiologische Bedingung dafür haben, daß eine Auffassung der Neutralfarben (nicht der Spektralfarben) ermöglicht werden kann. In der Nähe der Schwelle sieht, wie bekannt, das Spektrum dunkelgraulich aus sowohl für die Normalsehenden als für die Dichromaten — eine Erfahrung, die ihren populären Ausdruck in dem internationalen Sprichwort gefunden hat: bei Nacht sind alle Katzen grau —, und da die Totalfarbenblinden bei allen Beleuchtungen das Spektrum wie einen dunkler und heller nuancierten graulichen Streifen sehen, kann man Parinaud und v. Kries in ihrer Annahme folgen, daß die Stäbchen uns nur einen Eindruck von Schwarz, Weiß und Grau geben können, womit doch nicht gesagt sei, daß es ausschließlich die Stäbchen sind, denen wir alle unsere neutralen Farbenempfindungen verdanken. Für die Kries-Parinaudsche Theorie spricht auch der Umstand, daß das in der Dämmerung neutralgefärbte Spektrum erst stark spektralgefärbt wird bei einer Beleuchtung, die so stark ist, daß der Sehpurpur zu erblassen anfängt. Wir müssen annehmen, daß die Zapfen, die nach der Kries-Parinaudschen Theorie für unsere Auffassung der Spektralfarben maßgebend sind, hier vorzugsweise zu fungieren anfangen. Daß Rot um $\lambda = 650$ verschwindet, ohne zuerst graulich zu werden, wenn die Beleuchtung schwächer wird, kann man, wenn diese Farbentheorie richtig ist, dadurch erklären, daß der Sehpurpur so wenige der „roten“ Strahlen einsaugt (siehe Tabelle VIII, Kol. 2), daß diese für das Bewußtsein keine Rolle spielen können, solange die Stäbchen nur allein wirken. Es wird indessen, wie wir aus Tabelle VIII, Kolonne 1, sehen können, eine bedeutendere Energieentfaltung bei Rot als sonst irgendwo ge-

fordert, damit wir im Spektrum eine minimale Farbenempfindung empfangen können (die Reizempfindlichkeit ist also die geringste in Rot). —

Eine wesentliche und, wie mir scheint, ziemlich entscheidende Bestätigung der Behauptung, daß die Stäbchen uns nur neutrale Farbenempfindungen geben können, erreicht man auch, wenn man die Verteilung der Stäbchen und Zapfen in der Retina untersucht. Die zentrale Partie des unter der Macula gelegenen Teiles der Netzhaut, die sog. Fovea centralis, hat eine diametrale Ausdehnung von nur ca. $^1/_3$ mm.[1]) In diesem zentralen Teile der Netzhaut sind indessen, wie der Anatom Henle und andere nach ihm nachgewiesen haben, nur Zapfen, also nicht wie außer der Fovea sowohl Stäbchen als Zapfen. Die anatomisch besondere Stellung der Fovea macht sich für ein dunkel adaptiertes Auge jetzt auf die Weise geltend, daß die Farben, die man bei abnehmender Beleuchtung ausschließlich mit der Fovea sieht, früher unsichtbar werden, als wenn man mit den Seitenteilen der Netzhaut sieht; und dazu kommt, was in diesem Zusammenhange das Wichtigste ist, daß die Farben, wenn man mit der Fovea allein sieht, verschwinden, ohne erst ihre spektrale Qualität verloren zu haben. Die Schwellenwerte für Farben mit spektraler Qualität und die Schwellenwerte überhaupt fallen also, was die Fovea betrifft, ganz zusammen. Gleich außerhalb der Fovea verlieren die Farben, wie früher gesagt, ihre spektrale Qualität, wenn die Beleuchtung geschwächt wird; sie werden alle — die roten Farben doch ausgenommen — dunkelgraulich, bevor sie ganz verschwinden. Diese Beobachtung, daß die Spektralfarben, wenn wir ausschließlich mit der Fovea, also mit den Zapfen allein sehen, ohne erst graulich zu werden, verschwinden, spricht unstreitig stark dafür, daß die Stäbchen uns nur eine Empfindung von Schwarz, Weiß oder Grau geben können. Übrigens ist es sehr schwierig, mit der Fovea allein zu sehen; es fordert eine spezielle Versuchsanordnung und Übung, was wahrscheinlich der Grund ist, daß die obenerwähnte Erscheinung so lange übersehen worden ist.[2])

Während die Sehschärfe, wie gesagt, außerhalb des Randes der

---

[1]) Die Macula hat eine Ausdehnung von ca. 3 mm. Es ist nicht ungewöhnlich, die Ausdrücke „Macula“ und „Fovea“ ohne Unterschied gebraucht zu sehen, was sowohl unpraktisch als auch irreleitend ist. Die Farbenuntersuchungen der neuesten Zeit haben gezeigt, daß es oft eine absolute Notwendigkeit ist, hier genau zu reden.

[2]) Parinaud hat dieses 1884 entdeckt (Note à l'Academie des Sciences). Seine Abhandlung erregte doch, wenigstens außerhalb Frankreichs, so wenig Aufmerksamkeit, daß König, der zehn Jahre später dasselbe fand, glaubte, er sei der erste, der dieses gesehen habe.

Fovea für das dunkel adaptierte Auge die größte ist, sieht das für Licht adaptierte Auge mit dem Zentrum der Fovea am besten. Wenn das Auge hell adaptiert ist, fungieren die Zapfen entweder allein oder in Verbindung mit den Stäbchen, und das wird zur Folge haben, daß die Sehschärfe vom Zentrum, wo die Zapfen in Übergewicht sind, nach außen abnimmt. Dadurch wird jedenfalls teilweise die Unsicherheit erklärt, die lange in unseren Bestimmungen der Sehschärfe geherrscht hat. Man konnte früher oft die Merkwürdigkeit bezeugen, daß gewisse Experimentatoren durch besonders genaue Versuche das Resultat erlangten, daß die Sehschärfe außerhalb der Fovea die größte sei, während andere durch ebenso sorgfältige Versuche fanden, daß die Sehschärfe im Zentrum der Fovea die größte sei. Dieser scheinbare Widerspruch braucht doch nicht an unserem Vertrauen zu diesen Experimenten zu rütteln, vorausgesetzt, daß im ersten Falle in Dunkelkammer gearbeitet ist, im zweiten Falle mit einem hell adaptierten Auge. Treitel hat zuerst dieses nachgewiesen, nicht aber erklärt[1]. —

Ein weiterer Beweis, daß die Stäbchen nur auf die früher erwähnte Weise fungieren können, also als „Dunkelapparat", finden wir darin, daß alle oder fast alle Totalfarbenblinden ein absolutes oder fast vollständig zentrales Skotom haben, dessen Ausdehnung fast mit derjenigen der Fovea zusammenfällt. Man hat oft bezweifelt, daß dies der Fall sei, obgleich mehrere tüchtige Experimentatoren ein solches Skotom nachgewiesen zu haben vermeinten. Ein entscheidender Beweis, daß die Totalfarbenblinden ein zentrales Skotom haben können, findet sich bei Uhthoff (Zeitschr. usw., Bd. 20, 1899, p. 326 f.), dem es mittels eines ringförmigen Fixationszeichens gelang, bei Totalfarbenblinden ein solches Skotom zu finden; diese Farbenblinden hatte er sogar selbst früher untersucht, damals aber nicht vermocht, ein zentrales Skotom nachzuweisen. Sich ganz gewiss darauf verlassen, daß alle Totalfarbenblinden ein solches zentrales Skotom haben, kann man doch noch nicht. In einer Abhandlung von K. Grunert (Grafes Archiv Bd. 56, 1903, p. 132—95) gibt der Verfasser an, daß er unter fünf Totalfarbenblinden nur zwei mit zentralem Skotom fand. Daß man doch einer negativen Beobachtung keine entscheidende Bedeutung beilegen kann, geht mit Evidenz aus einer interessanten Beobachtung bei J. Bjerrum hervor. „Bei meinem Patienten", schreibt Bjerrum, „war es trotz wiederholter sorgfältiger Untersuchungen

[1]) Grafes Archiv, Bd. [illegible], [illegible], p. [illegible] f. Die Erscheinung ist später von Guillery sehr sorgfältig untersucht worden. Die hier erwähnte Erklärung findet sich schon bei Parinaud; siehe z. B. Parinaud, La Vision [illegible], wo er seine früheren Abhandlungen resümiert.

unmöglich, ein Skotom nachzuweisen .... daß es aber wohl möglich ist, es könne bei ihm ganz wohl ein zentrales Skotom gewesen sein, geht deutlich daraus hervor, daß es auch nicht möglich war, den normalen blinden Flecken in irgend einem seiner Augen nachzuweisen."[1]) — In der Fovea werden also alle oder jedenfalls die meisten Farbenblinden entweder gar nichts oder fast nichts (sehr dunkelgrau) sehen. Das kann auf die Weise erklärt werden, daß die Fovea, die bei Normalsehenden nur Zapfen enthält und deshalb nach v. Kries' Theorie besonders wirksam bei der Auffassung von Farben spektraler Qualität angenommen werden muß, bei den Totalfarbenblinden entweder ganz strukturlos ist, oder aus einer zerstreuten Schicht von Stäbchen (vielleicht ohne Sehpurpur) besteht.

Das zentrale Skotom bei den Totalfarbenblinden muß auch als die Ursache desjenigen Nystagmus angenommen werden, der immer bei diesen Farbenblinden vorkommt, und welcher die Nachweisung des Skotoms erschwert. Die Totalfarbenblinden, die ein zentrales Skotom haben, wo bei Normalsehenden ein Fixationspunkt gefunden wird, fixieren abwechselnd mit verschiedenen Stellen des Randes der Fovea. Da diese Farbenblinden ja alles grau in grau sehen, können wir annehmen, daß die Zapfen hier ganz fehlen oder auch außerhalb der Fovea funktionsunfähig sind, und daß solche Farbenblinden nur durch die Stäbchen Gesichtsempfindungen erhalten. Das ist auch aus einem anderen Grunde wahrscheinlich; man hat nämlich die Erfahrung gemacht, daß alle Totalfarbenblinden von gewöhnlichem Tageslichte ziemlich beschwert werden und im Sonnenscheine ganz hilflos sind. Das wird erklärlich, wenn man annimmt, daß sie nur Stäbchen haben; es ist in diesem Falle wahrscheinlich, daß die Totalfarbenblinden eine Beleuchtung nicht ertragen können, die so stark ist, daß der an die Stäbchen gebundene Purpur gebleicht wird. Möglich ist's, wie J. Bjerrum meint, daß man nicht hierdurch vollständig die schmerzhafte Blendungsempfindung erklären kann, die sich in diesem Falle einfindet, es ist aber doch wahrscheinlich, daß diese Farbenblinden, die unserer Annahme zufolge nur Stäbchen haben, bei einer Beleuchtung, die so stark ist, daß der Sehpurpur der Stäbchen gebleicht wird, in Verlegenheit geraten (lichtscheu sind); bei Normalsehenden würde der Zapfenapparat hier in Wirksamkeit treten.

Die hier erwähnte und verteidigte Farbentheorie, die wir die Kries-Parinaudsche genannt haben, ist vom Anatom Max Schultze

[1]) J. Bjerrum: et Tilfælde af medfødt total Farveblindhed etc. København 1904.

angedeutet, und von Parinaud bestimmt dargestellt und entwickelt worden. Parinauds Anschauungen von dem Sehpurpur und der Fluoreszenz der Netzhaut müssen doch als eine weniger glückliche Formulierung der Theorie betrachtet werden, die auch nicht in dieser Form Eingang gewonnen hat. Ein wenig später ist diese Farbentheorie aufgestellt und namentlich experimental durch v. Kries gestützt worden, der, unabhängig von Parinaud, dieselbe Theorie verteidigt und suppliert hat, indem er ihr namentlich einen experimentalen Unterbau gegeben hat. Es scheint, als ob hierdurch dem mehr als 40 jährigen Streite zwischen der Young-Helmholtzschen und Heringschen Farbentheorie ein Ende bald gemacht werden wird.[1]) Der Übergang von der Heringschen Theorie zu der Kries-Parinaudschen geschieht offenbar leichter als ein Übergang von der Young-Helmholtzschen Theorie; wiederum hat aber die Young-Helmholtzsche Theorie Verteidiger gehabt, die bei ihren Versuchen, die Theorie zu beweisen, die Farbenlehre mit einer Menge wichtiger Fakta bereichert haben. Viele der Tatsachen, auf welche die Kries-Parinaudsche Theorie erbaut werden kann, sind von dem Nachfolger von Helmholtz, A. König und von v. Kries (er war ursprünglich ein Anhänger dieser Theorie) gefunden worden. Diese Forscher haben durch eine Reihe musterhafter Versuche der neuen Hypothese und besonders der Verifikation derselben den Weg gebahnt. — Die Kries-Parinaudsche Theorie muß höher als die anderen Farbentheorien geschätzt werden; ist man auch hier so vorsichtig zu sagen, daß wir nur mit einer Hypothese zu tun haben, so hat doch die neue Hypothese den durchaus entscheidenden Vorzug, daß man hier auf bestimmte nachweisbare anatomische und physiologische Fakta baut.

J. Bjerrum, der übrigens an mehreren Punkten der Stäbchen-Zapfen-Theorie kritisch gegenübersteht, sagt hierüber (l. c. pag. 10) folgendes: „Diese Auffassung scheint mir durch viele verschiedene Tatsachen überaus gut motiviert, und ist gewiß auch ein Gegenstand allgemeinen Anschlusses.“ Merkwürdig genug hat die Heringsche Schule auf eine Schwierigkeit, die der Kries-Parinaudschen Theorie begegnet, kein besonderes Gewicht gelegt, eine Schwierigkeit, die v. Kries selbst hervorgehoben hat, und die in meinen Augen die einzige ist, der man besondere Wichtigkeit beilegen kann. Ich

---

[1]) In der früher zitierten Abhandlung von Grunert findet man eine vorzügliche Erörterung über einige der wichtigsten Probleme, die Bedeutung für die neue Farbentheorie haben. Trotz einem Versuche, die neuesten anatomischen Erfahrungen mit der Heringschen Farbentheorie zu kombinieren, hat diese Abhandlung Bedeutung als eine im großen und ganzen unparteiische Darstellung der wichtigsten Streitfragen.

denke an die Merkwürdigkeit, daß wir mit der äußeren Randzone der Netzhaut, die als totalfarbenblind betrachtet werden kann, das Spektrum mit ganz derselben relativen Lichtverteilung sehen, als wenn wir mit der zentralen Netzhautpartie sehen. v. Kries hat gezeigt, daß dieses wirklich der Fall ist.[1])

Eine sehr bedeutende Stütze kann diese Theorie von der komparativen Anatomie erwarten. Aus dem schon Vorliegenden kann als ein allgemein anerkannter Satz festgesetzt werden, daß diejenigen Wirbeltiere, die im Dunkeln leben oder gedämpftes Licht vorziehen, ausschließlich oder in überwiegendem Grade Stäbchen haben, während diejenigen Tiere, die mit dem Einbruch des Dunkels sich verbergen, nur Zapfen haben; dieses letztere gilt z. B. von den meisten Tagvögeln, bei denen der Stäbchenapparat entweder ganz fehlt oder dem Zapfenapparate gegenüber von vollständig untergeordneter Bedeutung ist. Die Nachtvögel, z. B. die Eulen, haben dagegen nur Stäbchen, was ihre Lichtscheuheit leicht erklärt. Daß es für den verschiedenen Gebrauch das beste ist, sowohl Stäbchen als auch Zapfen zu haben, wie z. B. der Mensch hat, versteht sich von selbst. Im Dunkeln sieht man allein mittels des feinmerkenden Stäbchenapparats, und nur neutrale Farben, und bei starkem Lichte ausschließlich mittels des mehr entwickelten Zapfenapparats, der zugleich die Auffassung der spektralen Farben ermöglicht. Bei starker Beleuchtung werden die Stäbchen außer Funktion gesetzt, bei schwacher Beleuchtung gilt dies den Zapfen, und bei zwischenliegenden Beleuchtungsstufen wirken der Theorie zufolge beide Sehapparate zusammen. — Das große Gewicht, das in der Stäbchen-Zapfen-Theorie auf das Anatomische gelegt wird, hat übrigens zur Folge gehabt, daß die Theorie größeren Anschluß bei den Anatomen als bei anderen gefunden hat, welche letztere oft der Voraussetzungen entbehren, um ihre Vorzüge zu schätzen. Es ist vollständig korrekt, wenn v. Kries sagt[2]): „Den Anatomen ist die Auffassung, daß die Zapfen die Organe des Farbensinnes sind und die Stäbchen nur farblose Helligkeitsempfindung vermitteln, seit lange, wie es scheint, geläufig gewesen und geblieben. Cajal spricht davon wie von einer sichergestellten und bekannten Tatsache.“[3]) — Nach dem jetzt Entwickelten wird es begreiflich sein, daß das zentrale Skotom der Totalfarbenblinden bei den Normalsehenden nicht ohne Analogie ist. Man ist im großen und ganzen darüber einig geworden, daß die Normalsehenden „Trichromaten“, wie man sie ja mit einem unglücklichen

[1]) Zeitschr. usw. 1897, Bd. 15, p. 247—279.
[2]) Zeitschr. usw. 1896, Bd. 9, p. 89.
[3]) Siehe Cajal: Retina der Wirbeltiere, 1894, p. 166.

Ausdrucke nennt, in der Dämmerung sehen, als hätten sie ein zentrales Skotom. Obgleich die Trichromaten Zapfen haben, wollen diese nämlich nicht in der Fovea oder außerhalb derselben fungieren, wenn die Beleuchtung stark geschwächt wird. Das wird, wie bei den Totalfarbenblinden, mitführen, daß bei sehr schwacher Beleuchtung etwas Nystagmus bei allen Trichromaten vorkommt.[1])

Daß auch die Dichromaten in der Dämmerung sehen, als ob sie ein zentrales Skotom hätten, ist höchst wahrscheinlich, da wir mit gutem Grunde vermuten, daß die Stäbchen auf fast gleichartige Weise bei den Normalen und den Dichromaten wirken müssen (siehe Tabelle VIII).

Die erwähnte eigentümliche Sehweise, die wir bei Normalsehenden in der Dämmerung wahrnehmen können, erklärt die Gesichtsempfindungen, die wir bekommen, wenn ein schwach glühender Körper mit verschieden adaptiertem Auge betrachtet wird. Man trifft bisweilen noch in physischen Lehrbüchern die Behauptung, daß Körper, die durch sukzessive Erwärmung in Glut gebracht werden, damit anfangen „rote" Strahlen oder Strahlen, die rötlich aussehen, auszusenden. Diese Behauptung, die man bis zur neusten Zeit treffen kann, ist nicht korrekt, wenn sie ohne alle Einschränkung aufgestellt wird; das wirkliche Verhältnis ist komplizierter. Merkwürdig genug hat man schon vor längerer Zeit beobachtet, daß glühende Körper unter gewissen Umständen gar nicht damit anfangen, Strahlen, die uns rot erscheinen, auszusenden, ohne daß diese Wahrnehmung früher als in der neusten Zeit hinreichend beachtet, geschweige erklärt worden ist. Schon im Jahre 1835 sagt Williams[2]), daß rotglühendes Eisen, das im Dunkeln abgekühlt wird, zuletzt bleich oder milchweiß aussieht. Dasselbe fand Aubert 1876, ohne daß es doch hierdurch gelang, die Aufmerksamkeit der Physiker auf die Sache hinzulenken. Erst als H. F. Weber[3]) im Jahre 1887 eine Reihe sehr sorgfältiger Versuche anstellte, um Drapers Satz[4]) zu widerlegen, wurde man in größeren physischen Kreisen darauf aufmerksam, daß die gangbare Auffassung aufgegeben werden müßte. — Weber experimentierte in Dunkelkammern, also mit dunkel adaptiertem Auge, und erreichte dadurch folgendes Resultat: Was man zuerst sieht, wenn ein Körper zu glühen anfängt, ist nicht

[1]) Bei den Totalfarbenblinden kommt Nystagmus selbst bei den höchsten Beleuchtungen vor, die diese Farbenblinden ertragen können, da hier nach der Theorie keine wirksamen Sehelemente in der Fovea sind.

[2]) Pogg. Ann. Bd. 36, p. 494.

[3]) Wied. Ann. Bd. 32, p. 256 f.

[4]) Philosoph. Mag. 1847, Bd. 30, p. 345. Draper sagt hier, daß alle festen Körper bei derselben Temperatur zu glühen anfangen, und daß am Anfang rote Strahlen ausgesandt werden.

etwas Rotes, sondern eine Farbe, die Weber „gespenstergrau“ oder „düsternebelgrau“ nennt, und er fügt hinzu: „Diese erste Spur düsternebelgrauen Lichtes erscheint dem Auge als etwas unstät glimmernd, auf und ab huschend.“ Wird die Temperatur erhöht, dann wird dieses Licht stärker (hellgrau oder aschgrau), und bei noch höherer Temperatur nimmt es eine hellgraue Farbe an, bis bei fernerem Steigen der Temperatur ein Augenblick kommt, wo der erste Schimmer des Roten („Feuerroten“) sich über die gelbgraue Schicht breitet. Gleichzeitig verschwindet die letzte Spur des „Hin- und Herzitterns“, die sich auf allen Stadien von „Grauglut“ zeigt, und das ausgeworfene Licht scheint jetzt absolut ruhig. — Weber betrachtete es als selbstverständlich, daß die von ihm beschriebenen Erscheinungen auf objektiven physischen Verhältnissen beruhten, bald aber begannen andere der Anschauung zuzuneigen, daß das Auge für die Farben, die man hier sehe[1]), wesentlich bestimmend sei, und im Jahre 1897 erklärte O. Lummer[2]) alles, was Weber hier beobachtet hatte, als eine Konsequenz der Kries-Parinaudschen Theorie. Lummer ist der Anschauung, daß „Grauglut“ von den Stäbchen, „Rotglut“ von den Zapfen herrühre. Da die Fovea nur Zapfen hat, und die Stäbchen bei schwacher Beleuchtung mehr feinmerkend als die Zapfen sind, sehen wir extrafoveal, wenn ein Körper im Dunkeln zu glühen anfängt, und mühen uns deshalb gegen Gewohnheit ab, um indirekt zu sehen; dadurch wird das von Weber beobachtete „unstäte Hin- und Herzittern“ hervorgerufen, das, wie Weber sagt, aufhört, sobald man rot sieht[3]), d. h. sobald die Zapfen zu fungieren anfangen und es wieder möglich wird, auf gewohnte Weise zu fixieren. Weiter zeigten Lummers Versuche, daß man bei einer so niedrigen Temperatur, daß man noch nichts direkt sieht, indirekt hellgrau sehe. Man merkt übrigens bei diesen Versuchen deutlich, was Lummer „Wettstreit der beiden Sehapparate“ nennt. —

Die Strahlen, die uns das erste grauliche Licht an den peripheren Teilen von der Retina geben, sind, wie mehrere Autoren[4]) es gefunden haben, die mittleren Strahlen des Spektrums. Das ist wahrscheinlich nur ein anderer Ausdruck dafür, daß die Kurve für die Reizempfindlichkeit an der Schwelle (P_n) das Maximum bei $\lambda =$ ca. 500 hat, was wir nach der früher gegebenen Erklärung der

---

[1]) Siehe Stenger-Wied. Ann. 1887, Bd. 32, p. 271.

[2]) Wied. Ann. Bd. 62, p. 14—30.

[3]) Wohl eigentlich schon, wenn man den ersten schwachen, gelblichen Schimmer sieht, der dem Rot vorausgeht.

[4]) Lecher (Wied. Ann. 1882, Bd. 17, p. 477) og Eberth (Wied. Ann. 1888, Bd. 53, p. 136).

Fähigkeit des Sehpurpurs, vorzugsweise grünliche (blaugrüne) Strahlen einzusaugen, zu verdanken haben. Übrigens ist die Erklärung, die Lummer von denjenigen Farben gegeben hat, die man bei im Dunkeln angestellten Versuchen sieht, wenn ein Körper zu glühen anfängt, so einfach und mit anderen Erfahrungen übereinstimmend, daß unser Vertrauen zu der Kries-Parinaudschen Farbentheorie auch hierdurch gestärkt wird.

§ 2.

Die spektralen Schwellenwerte.

Wir haben jetzt die Reizempfindlichkeit und dadurch die Schwellenwerte für gerade unterscheidbare Farben bestimmt und diese Werte in retinaler Energie ausgedrückt[1]). Diese Schwellenwerte können wir, da alle Farben bis „rot" um 650 herum hier mehr oder weniger dunkel graulich aussehen, „Schwellenwerte für Farben neutraler Qualität" nennen. Indessen kann hier von noch einer Gruppe Schwellenwerte die Rede sein. Wenn wir die Lichtstärke eines von Anfang an neutralgefärbten Spektrums sukzessiv vermehren, werden wir nämlich zuerst einen sehr schwachen, später aber einen mehr und mehr ausgeprägten spektralen Eindruck bekommen, und deshalb kann es zweckmäßig sein, die Bedingungen dafür zu bestimmen, daß die verschiedenen Farben mit einer eben unterscheidbaren spektralen Qualität gesehen werden können, oder, wie wir es auch ausdrücken können, es kann zweckmäßig sein, eine Bestimmung der Schwellenwerte für Farben spektraler Qualität zu suchen. Will man rationell zu Werke gehen, so muß man auch versuchen, die Schwellenwerte in retinaler Energie auszudrücken und das Verhältnis zwischen den Energien zu bestimmen, womit Strahlen verschiedener Brechbarkeit unsere Netzhaut beeinflussen müssen, damit wir nur so eben imstande sein können, die Farbe mit der ersten schwachen Spur spektraler Qualität zu sehen. Eine solche Untersuchung ist merkwürdigerweise noch nie vorgenommen worden, obgleich sie sowohl aus theoretischen als auch aus praktischen Gründen eine gewisse Bedeutung bekommen kann. Was wir bis jetzt von den Schwellenwerten für Farben spektraler Qualität gewußt haben, hat Ebbinghaus[2]) vollständig korrekt auf folgende Weise resümiert: „Bei welchen Verstärkungen der objektiven Lichtintensität die verschiedenen Strahlengattungen nicht mehr als Helligkeiten, sondern als Farben im engeren Sinn, als bunte Farben, erkannt werden, ist nicht genau bekannt. Man weiß nur, daß die

[1]) Siehe Tabelle VI, Kol. 7, wo wir die Zahlen für die Reizempfindlichkeit P_n finden; die reziproken Werte von P_n geben uns also die Schwellenwerte.

[2]) Psychologie, p. 207.

Verhältnisse für verschiedene Wellenlängen sehr verschieden liegen. Für langwelliges Licht fällt die spezifische Farbenschwelle sehr nahe an die allgemeine Empfindungsschwelle, d. h. wenn man bei allmählich wachsender Lichtintensität überhaupt etwas sieht, wozu es schon ziemlich beträchtlicher Intensitätswerte bedarf, erkennt man auch sehr bald (richtiger: gleich!) das Gesehene als rot. Bei mittleren Wellenlängen dagegen fallen die beiden Schwellenwerte sehr weit auseinander; die Strahlen dieser Gegend werden schon bei äußerst geringer objektiver Stärke als etwas Helles empfunden, aber damit die Empfindung grün hinzutrete, bedarf es einer erheblichen Steigerung des objektiven Lichts." — Da hier eine Unvollkommenheit in unserem Wissen vorhanden ist, habe ich durch Experimente versucht, eine vorläufige Bestimmung des Verhältnisses zwischen den reziproken Werten derjenigen Energiegrößen zu geben, die die Netzhaut treffen müssen, damit wir eben die Farben mit spektraler Qualität sehen können. Wenn wir auch jetzt vorziehen, nicht mit den angewandten Energiegrößen, sondern mit ihrem reziproken Werte zu rechnen, so ist der Grund dazu wie früher der, daß es hier das größte Interesse hat, unsere Reizempfindlichkeit zu kennen, und diese Größe, die Reizempfindlichkeit für Farben eben unterscheidbarer Qualität, ist offenbar umgekehrt proportional zu der angewandten Energie (oder je größere Energie nötig ist, damit eine Farbe mit spektraler Energie gesehen werde, desto geringer ist unsere Empfindlichkeit für die Farbe).

Die Versuche, die dazu dienten, unsere Reizempfindlichkeit für Farben spektraler Qualität zu bestimmen, wurden im psychophysischen Laboratorium Kopenhagens angestellt (in Dunkelkammer und mit gut dunkeladaptiertem Auge). Durch einen Farbenmischungsapparat, der vom Direktor des Laboratoriums, Dr. A. Lehmann [1]), konstruiert worden ist, konnte man sukzessiv die eine Hälfte des zirkulären Gesichtsfeldes mit irgendwelcher homogenen Farbe beleuchten. Die andere Hälfte des Gesichtsfeldes wurde vom weißlichen Lichte einer Auerlampe erfüllt. Die Schwellenwerte wurden nicht, wie sonst bei derartigen Versuchen, durch Spaltbreiten bestimmt, sondern durch Dunkelgläser, die photographisch dargestellt waren. Die Lichtstärke in beiden Hälften des Gesichtsfeldes konnte durch diese Dunkelgläser, deren Durchlässigkeitskoeffizient früher bestimmt worden war, nach Belieben verkleinert werden. Die Versuche wurden nun so angestellt, daß man diejenige Spektralfarbe, die untersucht wurde, so viel verdunkelte, daß die letzte schwache

---

[1]) Siehe Versuchsbeschreibungen desselben Verfassers in Phil. Studien. 1902, Bd. 20, p. 79—89.

Spur der spektralen Qualität der Farbe zu verschwinden drohte. Danach verdunkelte man das weiße Feld, das zur Vergleichung diente, bis es ebenso hell schien — oder wie die Versuchspersonen gewöhnlich sagten „ebenso dunkel" — als dasjenige Feld, das durch homogenes Licht erleuchtet wurde. War das getan, so trat die spektrale Qualität der Farbe immer oder fast immer wieder deutlich hervor, und man mußte deshalb durch wiederholte Einstellungen die Lichtstärke der Spektralfarben verkleinern, um endlich eine Grenze zu erreichen, wo man, selbst nachdem das weiße Feld wieder ebenso hell als das homogene Feld gemacht worden war, nur eine so schwache Spur der spektralen Qualität der untersuchten Farbe sah, daß eine weitere Verdunkelung der homogenen Farbe ihre spektrale Qualität ganz zum Verschwinden brachte, d. h. die Farbe grau machte. Die bei der letzten Einstellung benutzten Dunkelgläser gaben dann durch ihren Durchlässigkeitskoeffizienten die Schwellenwerte an, also diejenigen Energien (oder richtiger: das Verhältnis zwischen den Energiegrößen), die angewandt werden mußten, damit in dem Spektrum, womit gearbeitet wurde, dem des Auerlichtes, die Farben mit eben unterscheidbarer spektraler Qualität gesehen werden könnten. Nimmt man die reziproken Werte der so gefundenen Verhältniszahlen, so erfährt man, wie groß die Reizempfindlichkeit für Farben spektraler Qualität im gegebenen Spektrum ist. Wir brauchen also nur diese Werte für die Reizempfindlichkeit in ein absolutes oder damit proportionales Maß umzurechnen, indem wir auf gewöhnliche Weise (siehe Tab. VI) die Energieverteilung im benutzten Spektrum und die elektive Absorption in der Macula lutea berücksichtigen[1]). — Die Versuchsweise ist sehr einfach und selbstverständlich, aber es ist doch ziemlich schwierig, diese Versuche anzustellen. Es zeigte sich nämlich, daß es keine geringe Übung und eine sehr intensive Aufmerksamkeit erheischt, wenn man bestimmen soll, wann eine Farbe im Begriffe ist, ihre spektrale Qualität zu verlieren. Komtesse Sponneck und Dozent Herrlin, welche die Güte hatten mir bei diesen Versuchen zu helfen, erreichten deshalb Resultate, die weder untereinander noch mit meinen eigenen Versuchen übereinstimmten. Es ist möglich oder eher sicher, daß die Resultate gleichartiger sein würden, wäre mehr Zeit auf die Übungsversuche verwendet worden, was aus verschiedenen Gründen sich nicht tun ließ; doch selbst wenn

[1]) Hierzu ist doch zu bemerken, daß die Energiekurve für Auerlicht, wie früher gesagt, wahrscheinlich nicht mit hinreichender Genauigkeit bestimmt worden ist (siehe oben). Doch kommt es mir vor, daß diese Ungenauigkeit hier keine entscheidende Bedeutung haben kann, wo die Observationen selbst mit großen Fehlern behaftet sind.

die Übung eben diese Erscheinung zu beobachten sehr weit getrieben wird, wird doch immer eine bedeutende Unsicherheit bleiben allein wegen des Fluoreszenzlichtes der Netzhaut, das auf diese Versuche sehr einwirkt. Ein anderes Hindernis, das schwerlich auch nach langer Übung verschwindet, liegt darin, daß wir nur mit großer Schwierigkeit bestimmen können, wann die gelblichen Farben ihre spektrale Qualität verlieren; im täglichen Leben sind wir daran gewöhnt geringere Quantitäten des gelben Lichts — z. B. bei fast allen Gattungen künstlichen Lichtes — zu übersehen, und es ist nicht leicht diese Gewohnheit abzulegen. Etwas Ähnliches

Tabelle IX.

λ	1 *H*	2 *S*	3 *K*	4 P_3
656	0,22	0,32	0,095	0,26
620	0,58	0,63	0,48	0,68
600	0,72	0,90	0,85	0,86
590	0,68	1,00	0,86	0,95
580	0,65	0,83	0,68	0,94
570	0,68	0,68	0,66	0,94
560	0,79	0,73	0,77	0,96
550	1,00	0,72	0,95	1,00
540	0,86	0,65	1,00	0,96
530	0,63	0,50	0,92	0,85
520	0,37	0,40	0,83	0,70
510	0,26	0,36	0,70	0,55
500	0,20	0,35	0,44	0,44
490	0,18	0,32	0,29	0,35
480	0,18	0,24	0,22	0,29
470	0,22	0,17	0,20	0,25
460	0,20	0,12	0,20	0,23
450	0,22	0,088	0,19	0,20
440	0,18	0,072	0,14	0,19
430	0,26	0,13	0,11	0,21

gilt, doch in geringerem Grade, von den anderen Spektralfarben; weißes Licht, mit kleinen Quantitäten einer Spektralfarbe vermischt, sind wir geneigt, als rein weißes zu betrachten[1]). Es ist daher sehr wichtig, ein weißes Licht zum Vergleich bei diesen Versuchen zu haben, und ich muß gestehen, daß einige der bedeutenden Fehler, die zweifelsohne in unsere Bestimmungen sich einschleichen, davon herrühren können, daß Auerlicht als Vergleichslicht angewandt worden ist, das ja etwas gelblich ist. Ehe die Versuche fast abgeschlossen waren, stand es mir nicht ganz klar, welche Bedeutung dies haben kann. —

[1]) Auch nicht bei den „absoluten Werten", d. h. den direkt bestimmten (nicht umgerechneten) Durchlässigkeitskoeffizienten, können typische individuelle Verschiedenheiten nachgewiesen werden; die Differenzen haben hier einen ganz zufälligen Charakter; die Versuchspersonen kommen, was eine einzelne Farbe betrifft, übrigens nicht selten zu demselben Resultat.

In Tabelle IX sind die in retinale Energie umgerechneten Versuchsresultate angegeben. Jede Versuchsperson stellte nach einigen Übungsversuchen zwei Versuchsreihen an, deren Mittelzahl wir genommen haben. Die hierdurch erreichten drei Versuchsreihen sind in Tabelle IX, Kolonne 1—3, angegeben, und man sieht daraus, daß sich bedeutende Schwingungen in jeder Reihe finden, wie es auch deutliche individuelle Verschiedenheiten gibt. Da die letzten doch kaum einen ausgeprägten typischen Charakter[1]) annehmen, haben wir in Kolonne 4 die Mittelzahl der drei Versuchsreihen genommen und durch die früher benutzte Interpolationsformel (siehe oben) die hierbei gefundenen Zahlenwerte ausgeglichen. Die Werte in Kolonne 4 geben uns also eine vorläufige Bestimmung der relativen Reizempfindlichkeit für Farben spektraler Qualität (P_S). Daß diese Werte in genauem Zusammenhange mit der Wirksamkeit der Zapfen stehen, ist nach unserer Auffassung der Funktion der Stäbchen und der Zapfen sehr wahrscheinlich, und wir werden in anderem Zusammenhange diese Anschauung durch verschiedene Argumente begründen.

Purkinjes Phänomen.

Der Physiolog Purkinje ist der erste, der beobachtet hat, daß die relative Lichtverteilung in einem Spektrum bei verschiedenen Beleuchtungen verschieden ist.[2]) Macht man alle Farben des Spektrums gleich hell mit einem bestimmten Vergleichslichte und verkleinert man dann die Lichtstärke des Spektrums, indem man z. B. den Spalt verkleinert, durch den das Licht in einen Spektralapparat dringt, so werden die verschiedenen Spektralfarben nicht länger gleich hell sein; obgleich die blauen Farben einen bedeutenden Sättigungsverlust gelitten haben, werden sie jetzt viel heller als die roten sein. Diese Erscheinung, Purkinjes Phänomen, wie man es nennt, ist in hohem Grade frappant, so frappant, daß man sich wundern muß, daß es nicht früher bemerkt worden ist.[3]) Wenn man sagt, daß die blauen Farben in der

[1]) Später werden wir erwähnen, daß das weiße Licht, das sich durch Komplementärmischung ergibt, als Repräsentant alles anderen weißen Lichtes betrachtet werden kann, und den Beweis liefern, daß es sich so verhält.

[2]) Purkinje, Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne. Bd. 2, p. 109 f., 1825.

[3]) Es ist eigentlich merkwürdig, daß ein Physiolog und nicht ein Maler es zuerst beobachten sollte. Dove und Grailich, die voneinander unabhängig dieselbe Beobachtung wie Purkinje machten, weisen doch zu denjenigen Erfahrungen zurück, die sie während Betrachtung von Gemälden gemacht haben, wo die Erscheinung besonders hervortretend sein kann. Dove sagt (Pogg. Ann. Bd. 85,

Dämmerung oder überhaupt bei schwächerer Beleuchtung heller werden als die roten, so ist das eigentlich nur ein spezieller Ausdruck für die Tatsache, daß das Lichtmaximum im Spektrum sich bewegt, wenn die Beleuchtung variiert. Dieses Maximum liegt bei starker Beleuchtung in Gelb, geht aber in der Dämmerung ganz ins Grüne über. Die Verschiebung des Lichtmaximums ist so bedeutend, daß man ohne nähere Untersuchung, nur durch eine flüchtige Betrachtung, sie sehen kann. Vorausgesetzt, daß das Auge hinreichend für das Dunkel adaptiert ist, können wir deutlich sehen, daß das Maximum sich bewegt. Selbst wenn indessen kein Zweifel sein kann, daß das Lichtmaximum sich verschiebt, wenn die Beleuchtung variiert, leuchtet es doch ein, daß es eine gewisse Bedeutung haben wird, eine genaue quantitative Bestimmung der relativen Lichtverteilung im Spektrum bei verschiedenen Beleuchtungen zu bekommen. Eine solche quantitative Untersuchung ist von König vorgenommen worden, der in Festschrift f. Helmholtz[1]) eine Monographie über das Purkinjesche Phänomen geschrieben hat. Jeder zuverlässige Versuch, die Ursachen zu finden, die für das Purkinjesche Phänomen bestimmend sind, müssen am besten auf die genauesten quantitativen Bestimmungen dieser Erscheinung sich stützen, und die genaueste und namentlich die am besten durchgeführte Bestimmung hiervon finden wir bei König in der erwähnten Abhandlung. Es wird deshalb notwendig sein, von diesen Versuchen Königs auszugehen, die uns lehren können, was man sieht, wenn die Beleuchtung innerhalb gewisser Grenzen variiert.

Königs Versuchen, eine genaue quantitative Bestimmung des Purkinjeschen Phänomens zu geben, haftet indessen, wie so vielen Versuchen dieses Forschers, der von ihm selbst anerkannte Mangel an, daß er auch hier seine Resultate nicht (oder doch nur ausnahmsweise und dann mit unvollkommenen Hilfsmitteln) in Energie umgerechnet hat. Dazu kommt, daß König auch hier nicht hat Rücksicht nehmen können auf die Absorption in der Macula; dies konnte nicht angehen, da Sachs' Bestimmungen der Maculaabsorption — die einzigen verläßlichen und ganz durchgeführten, die bisher vorliegen — erst von 1896 sind, während Königs Abhandlung von 1891 ist. König beklagt es selbst, daß er auf die elektive Absorption in der Macula lutea nicht Rücksicht nehmen

1852, p. 398): „Es ist mir aufgefallen, daß, wenn ich bei einbrechender Dunkelheit eine Gemäldegalerie verließ und einen letzten flüchtigen Blick auf die Bilder warf, rote Gewänder mir schon vollkommen verdunkelt erschienen, während ein blaues noch in voller Kraft der Farbe hervortrat." Eine ähnliche Beobachtung erwähnt Grailich im Sitzungsber. d. Wiener Akad. math.-naturw. Klasse. Bd. 13, p. 251, 1854.

[1]) Helligkeitswerte der Spektralfarben usw.

konnte. Er sagt hierüber pag. 64 folgendes: „Ich will nicht unterlassen, mit besonderem Nachdruck darauf hinzuweisen, daß alle diese Werte einen großen, tief eingreifenden Fehler besitzen, indem nämlich die Absorption in der Macula lutea vernachlässigt ist. Ob es später gelingen wird, diese Fehler . . . zu beseitigen, muß erst die Erfahrung lehren.“ Es wird also Grund dazu vorhanden sein, die Untersuchungen Königs in dieser Hinsicht zu supplieren.

Tabelle X.

λ	König									Köttgen	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	H	*G*	*F*	*E*	*D*	*C*	*B*	*A*	*S*	*A*	*H*
670	0,855	0,813	0,713	0,511	0,219	0,0689	0,0344	0,00529	0,00338	0,0113	1,120
650	2,381	1,828	1,499	1,009	0,513	0,167	0,0722	0,0114	0,00561	0,0253	2,137
625	3,460	3,257	2,551	2,012	0,996	0,341	0,161	0,0487	0,0288	0,0630	3,413
605	3,650	3,460	3,115	2,217	1,151	0,482	0,233	0,116	0,0825	0,146	3,247
590	3,030	2,890	2,660	1,912	1,271	0,537	0,364	0,233	0,177	0,319	2,645
575	2,358	2,179	2,277	1,761	1,152	0,704	0,596	0,501	0,362	0,479	1,923
555	1,695	1,658	1,610	1,425	1,142	0,964	0,913	0,812	0,713	0,866	1,389
535	1.	1.	1.	1.	1.	1.	1.	1.	1.	1.	1.
520	0,554	0,565	0,567	0,586	0,716	0,859	0,892	0,919	0,934	0,951	0,553
505	0,224	0,246	0,267	0,360	0,434	0,553	0,629	0,634	0,650	0,739	0,250
490	0,0994	0,105	0,112	0,125	0,203	0,300	0,327	0,334	0,427	0,386	0,092
470	—	0,0375	0,0436	0,0483	0,0906	0,129	0,138	0,154	0,167	0,186	—
450	—	—	0,0159	0,0175	0,0246	0,0413	0,0477	0,0466	0,0521	0,0600	—
430	—	—	—	0,00663	0,00725	0,00839	0,0116	0,00867	0,00760	0,0120	—

Bei seinen Versuchen, eine Bestimmung von Purkinjes Phänomen zu geben, ging König auf folgende Weise vor: er bestimmte die Größe, die er den Spalten seines Spektralapparats an verschiedenen Stellen geben mußte, um Farben zu sehen, die ebenso hell waren wie ein bestimmtes Vergleichslicht. Die reziproken Werte der gefundenen Spaltbreiten — was König „Helligkeitswerte“ nennt — geben dann für das benutzte Spektrum die Reizempfindlichkeit des Auges für Farben an, die gleich hell sind wie ein bestimmtes Vergleichungslicht. Wird die Lichtstärke des Vergleichslichtes vermehrt, und nimmt man eine analoge Bestimmung vor, so erhält man auf dieselbe Weise eine neue Reihe von Werten, die die Reizempfindlichkeit für Farben angeben, die ebenso hell sind wie das neue, stärkere Vergleichungslicht. Auf diese Weise kommt König zu einer ganzen Reihe „Helligkeitskurven“, wie er sie nennt. Diese Kurven (s. Tabelle X) sind natürlich mit vielen Fehlern behaftet, da es ja nicht so leicht ist, zu bestimmen, wann die verschiedenen Spektralfarben gleich hell sind. Man hat jedoch die Schwierigkeiten, die sich hier geltend machen, oft überschätzt. Eine besonders große Genauigkeit kann man nicht erwarten, aber bei gehöriger Übung können die Fehler so klein werden, daß man

gleichwohl eine gute Übersicht über das Purkinjesche Phänomen bekommen kann. Dies ergeben Königs Versuche zweifellos, und da seine Mitarbeiterin. Frl. Köttgen, zu ganz ähnlichen Resultaten kam, kann man daraus schließen, daß König keine durchaus einzig dastehende, speziell entwickelte Fähigkeit besaß, zu beurteilen, wann die Farben gleich hell sind.

In Tabelle X findet man Königs und Frl. Köttgens Resultate. In Kolonne 1 und 11, den H-Reihen, sind die reziproken Werte jener Spaltbreiten angegeben, die man gebrauchen mußte, damit die Spektralfarben gleich hell erscheinen konnten, wenn das Vergleichungslicht eine Lichtstärke $= H$ hatte. In der Kolonne 2 der G-Reihe sind die reziproken Werte der Spaltbreiten angegeben, die angewandt werden mußten, damit die Spektralfarben gleich hell erscheinen konnten, wenn das Vergleichungslicht eine Lichtstärke $= G$ hatte, und so weiter bis zur S-Reihe (exkl.). Die Helligkeit des Vergleichungslichtes war bei den verschiedenen Versuchen $= A$[1]$) = 1$, $B = 16$, $C = 256$, $D = 1024$, $E = 4096$, $F = 16384$, $G = 65536$, $H = 262144$.

Kolonne 9, die S-Reihe, gibt Königs Versuchsresultate an der Schwelle an, indem er auch hier die Reizempfindlichkeit durch die reziproken Werte jener Spaltbreiten angegeben hat, die gebraucht werden mußten, damit er eine eben unterscheidbare (neutrale) Empfindung erhalten konnte. Die Werte in der S-Reihe sind dieselben, die wir früher benutzt haben (siehe Tabelle VI, Kolonne 1), und wir haben darauf aufmerksam gemacht, daß König voraussetzt, daß alle S-Werte einem bestimmten Vergleichungslichte entsprechen, d. h. mit ihm gleich hell sind (was man eben unterscheiden kann, hat gleiche Helligkeit, sagt König). Die S-Reihe zeigt also die Reizempfindlichkeit an der Schwelle und enthält also Werte, die man hier unter dem Gesichtspunkte sieht, daß man sie durch Vergleichung mit einem bestimmten eben unterscheidbaren Vergleichungslichte von der Lichtstärke S gefunden denken kann. Wir können übrigens durch Vergleichung der S- und A-Reihe in Königs Tabelle sehen, daß König dazu berechtigt ist, eben unterscheidbare Farben [2]als äquiluzid zu betrachten. Die S-Reihe fällt nämlich fast ganz zusammen mit der A-Reihe, die ja die reziproken Werte der Breite angibt, die man dem Spalte des Spektralapparates geben muß, um alle Farben des Spektrums gleich hell zu sehen, wie ein Vergleichungslicht von der Lichtstärke A, wo A ein sehr schwaches Licht ist. König hat

[1]) Der Wert der gewählten Einheit wird von König angegeben, dessen Versuche dadurch nicht bloß relative, sondern auch absolute Bedeutung erhalten können.

[2]) Vgl. die Erklärung zu Tabelle VI.

zu bestimmen gesucht, um wieviel ein Vergleichungslicht von der Helligkeit A vermindert werden mußte, um eben unterscheidbar zu werden (um zur Schwelle hinabkommen zu können), und er kam zu dem Resultate, daß $S = \text{ca. } 0{,}2\,A$. In Tabelle X sind vergleichshalber H- und A-Werte Frl. Köttgens angegeben, die nur bei der höchsten und niedrigsten Beleuchtung Versuche angestellt hat. Wir wollen nun auf ganz gleiche Weise, wie bei früher besprochenen Versuchen, Königs Untersuchungen des Purkinjeschen Phänomens so supplieren, daß wir Umrechnungen von Spaltbreite in Energie vornehmen und außerdem auf die elektive Absorption in der Macula lutea Rücksicht nehmen. Dagegen brauchen wir

Tabelle XI.

λ	König									Köttgen	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	P_H	P_G	P_F	P_E	P_D	P_C	P_B	P_A	P_S [1]	P_A	P_H
670	0,11	0,11	0,098	0,081	0,033	0,009	0,004	0,0006	0,0004	0,0012	0,18
650	0,40	0,36	0,30	0,25	0,12	0,034	0,015	0,003	0,002	0,0046	0,45
625	0,68	0,66	0,58	0,49	0,25	0,082	0,040	0,018	0,012	0,021	0,74
605	0,83	0,86	0,80	0,67	0,38	0,14	0,081	0,050	0,034	0,052	0,92
590	0,99	0,98	0,94	0,82	0,51	0,23	0,17	0,13	0,092	0,12	1,00
575	1,00	1,00	1,00	0,93	0,66	0,39	0,32	0,27	0,22	0,25	1,00
555	0,95	0,96	0,98	0,99	0,82	0,60	0,53	0,49	0,42	0,45	0,97
585	0,88	0,86	0,89	1,00	0,95	0,82	0,77	0,74	0,68	0,70	0,90
520	0,66	0,71	0,74	0,91	1,00	0,97	0,95	0,93	0,90	0,90	0,76
505	0,48	0,53	0,57	0,76	0,94	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,58
490	0,31	0,35	0,40	0,54	0,75	0,86	0,87	0,88	0,92	0,91	0,33
470	—	0,19	0,23	0,35	0,53	0,63	0,64	0,65	0,68	0,69	—
450	—	—	0,11	0,18	0,27	0,33	0,35	0,35	0,35	0,39	—
480	—	—	—	0,15	0,16	0,16	0,20	0,15	0,12	0,18	—

[1]) P_S ist in Tabelle VI eingeführt, wird aber dort P_u genannt.

nicht vorauszusetzen, daß elektive Absorption in der Linse gewesen ist; König war nämlich ca. 35 Jahre alt, als er diese Versuche anstellte. Wir gebrauchen bei der Umrechnung die Energiekurve für Hefnerlicht (wozu wir berechtigt sind, da König mit einem Gastriplexbrenner experimentiert hat, siehe Tabelle 1, Kolonne 1 und 12), wie auch für die Durchlässigkeitskoeffizienten der Macula die Werte in Tabelle IV. Indem wir auf ganz gleiche Weise wie früher vorgehen, kommen wir zu folgender Tabelle für die reziproken Werte der retinalen Energie, die angewendet werden muß, damit wir an verschiedenen Stellen im Spektrum gleich helle Farben sehen (siehe Tabelle XI).[1]) Die Buchstaben S, A, B, C, D, E, F, G und H haben dieselbe Bedeutung wie bei König und

[1]) In Königs Tabellen ist der Wert bei $\lambda = 535$ beständig $= 1$ gesetzt. Das ist ganz willkürlich; wir können deshalb, wie wir zu tun pflegen, den maximalen Wert in jeder Versuchsreihe $= 1$ setzen.

bezeichnen also die Stärke des Vergleichslichtes (für *S* jedoch des gedachten Vergleichslichtes) bei den verschiedenen Versuchen. Man kann also sagen, daß die Werte, die in Tabelle XI angeführt sind, die Reizempfindlichkeit für gleich helle Farben bei verschiedenen Beleuchtungen *S-H* angeben, so daß die Reizempfindlichkeit im Gegensatz zu dem, was bei Königs Versuchen der Fall war (siehe Tabelle X), jetzt in retinaler Energie und folglich ganz unabhängig von dem Spektrum angegeben ist, womit gearbeitet wurde.

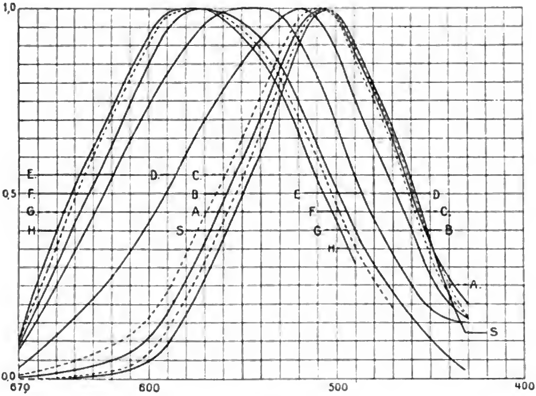


Fig. IV.

Die Kurven in Fig. IV sind nach Tabelle XI gezeichnet, und betrachtet man Fig. IV näher, so sieht man deutlich, daß die dort verzeichneten Kurven sich in verschiedene Gruppen verteilen. Bei den Versuchsreihen, wo das Vergleichslicht sehr lichtschwach war (die Kurven *S*, *A*, *B*, *C*), fallen die Resultate fast vollständig zusammen, doch sieht man eine kleine Verschiebung des Maximums gegen das am wenigsten brechbare Ende des Spektrums, indem das Vergleichslicht nach und nach etwas heller wird (also wenn man von *S* nach *C* geht). Etwas Ähnliches macht sich, jedoch in weniger ausgeprägtem Maße, dort geltend, wo das Vergleichslicht sehr stark gewesen ist, in den Kurven *H*, *G* und zum Teil auch *F*. Auch diese Kurven kommen einander ziemlich nahe, indem jedoch das Maximum etwas gegen das am wenigsten brechbare Ende des

Spektrums hinrückt, wenn das Vergleichslicht heller wird, d. h. wenn man von *F* nach *H* geht. Die Kurven *E* und *D* (siehe auch Tabelle XI) sind dagegen sehr verschieden und in verschiedener Lage; sie unterscheiden sich deutlich sowohl untereinander als auch von den zwei genannten Kurvengruppen. Wenn man nur Fig. IV betrachtet, könnte man daher auf den Gedanken kommen, daß bei schwachem Lichte eine Art Wirksamkeit da ist, die sich durch Kurven jener Form äußert, die wir bei den *S-A-B-C*-Kurven finden, während bei starkem Lichte eine andere Wirksamkeit vorhanden ist, die sich durch die Kurven manifestiert, die wir bei *H*, *G* und *F* finden. Die dazwischenliegenden Kurven, d. h. die Kurven *D* und *E*, d. h. die Kurven, die mittelstarken Beleuchtungen entsprechen, kann man sich als eine Art Interferenzkurven durch das Zusammenwirken der Außenkurven *S* und *H* entstanden denken. Auf diesen Gedanken könnte man, wie gesagt, kommen, wenn man die Kurven in Fig. IV betrachtet, und wir werden später eine ausführlich motivierte Begründung der Richtigkeit dieses Gedankens geben. Wir wollen in Hinblick auf Tabelle XI nur noch bemerken, daß individuelle Verschiedenheiten zwischen Leuten mit normalem Auge auf ihre Auffassung des Purkinjeschen Phänomens keinen Einfluß zu haben scheinen. Dies ging schon aus einem Vergleiche zwischen Königs und Frl. Köttgens Versuchen bei der Angabe in Spaltbreiten Tabelle X, hervor, aber die Ähnlichkeit der *H*- und *A*-Kurven dieser beiden Beobachter ist noch hervortretender geworden, nachdem eine Umrechnung in retinale Energie stattgefunden hat, wo wir, wie gewöhnlich, die Versuchsresultate mit Hilfe der Interpolationsformel (siehe oben) ausgeglichen haben. Tabelle XI zeigt, daß der Unterschied zwischen Königs und Frl. Köttgens Resultaten — wenn man sie umrechnet — so gering ist, daß hier nicht von typischen, sondern nur von zufälligen individuellen Abweichungen die Rede sein kann.

Wir haben nun gesehen, wie groß die Helligkeitsverschiebung im Spektrum werden kann, und in welcher Richtung sie bei Variation der objektiven Beleuchtung geht, und wir wollen hernach untersuchen, was wohl die Ursache einer so großen Inkonstanz in der Helligkeitsverteilung sein kann. Historisch gesehen, blieb man erst bei der Erklärung stehen, daß Purkinjes Phänomen eine objektive physische Ursache habe, indem man annahm, daß die blauen Strahlen in der Dämmerung weniger stark absorbiert würden als die roten. Diese Erklärung findet man z. B. bei Seebeck in seiner klassischen Abhandlung über Farbenblindheit[1]). Man kann sich

[1]) Pogg. Ann. [illegible] B. 42.

indessen leicht davon überzeugen, daß die Helligkeitsverschiebung, die wir Purkinjes Phänomen nennen, nicht von täglichen Veränderungen in der Absorption der Atmosphäre herrühren kann; dies geht deutlich aus einigen Versuchen hervor, die Langley angestellt hat.[1]) Langley gibt hier Energiekurven sowohl für hohen als für niedrigen Sonnenstand an, und bei Vergleichung dieser Energiekurven zeigt es sich, daß das Übergewicht, das die roten Strahlen bei hohem Sonnenstand über die blauen haben, bei niedrigem Sonnenstande keineswegs geringer wird; es erhält im Gegenteil — relativ gesehen — einen kleinen Zuwachs. Übrigens ist es nicht notwendig, zu den Physikern zu gehen, um zu erfahren, daß das Purkinjesche Phänomen nicht durch Veränderungen in der Absorption der Atmosphäre verursacht wird. Man kann nämlich, wie es schon längst erwiesen worden ist, das Purkinjesche Phänomen zu jeder beliebigen Zeit des Tages sehen, vorausgesetzt, daß man bloß dafür sorgt, daß das Auge dunkel adaptiert ist, also z. B. das Phänomen in einer Dunkelkammer untersucht. Hierbei ist nur zu merken, daß das Auge gut adaptiert sein muß; es ist da keineswegs hinreichend, das Spektrum allein zu verdunkeln, man muß den ganzen Raum verdunkeln, worin der Beobachter sich befindet. In der Dämmerung erhält man eine solche Adaptation auf natürliche Weise, ohne daß man besondere Veranstaltungen zu treffen braucht. —

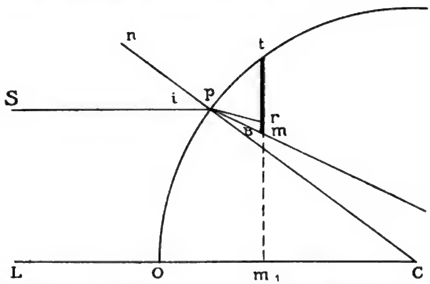
Der Umstand, daß die Adaptation bei der Auffassung des Purkinjeschen Phänomens von entscheidender Bedeutung ist, deutet in hohem Grade darauf hin, daß wir es hier mit einem physiologischen Phänomen zu tun haben, d. h. daß die Ursache in Veränderungen im Auge zu suchen ist. Da man sagen kann, daß Purkinjes Phänomen in summarischer Weise dadurch ausgedrückt werden kann, daß die blauen Farben in der Dämmerung ein relatives Übergewicht über die roten erhalten, könnte es nahe liegen, anzunehmen, daß hier die Erweiterung der Pupille von Bedeutung ist. Entscheidend für die Auffassung des Purkinjeschen Phänomens kann die Pupillenerweiterung wohl keineswegs werden, da man dieses Phänomen auch deutlich sieht, wenn man eine sog. „künstliche Pupille" benutzt, d. h., durch eine so kleine Öffnung sieht, daß die Erweiterung der Pupille keine Rolle zu spielen vermag. Bei Königs Versuchen, eine quantitative Bestimmung des Purkinjeschen Phänomens zu geben, wurde auch mit einer künstlichen Pupille gearbeitet, und der Einfluß, den die Erweiterung der Pupille sonst möglicherweise haben könnte, ist deshalb ganz eliminiert sowohl in Königs Ergebnissen, als auch bei den Umrechnungen in retinale Energie, die wir, darauf gestützt, vorgenommen haben.

[1]) Wied. Ann. 1883, Bd. 19, p. 226—244 u. 384—400.

Da es indessen gleichwohl besonders im Hinblick auf die Malkunst einiges Interesse hat, zu sehen, wie die Helligkeitsverschiebung wird, wenn man den Einfluß, den die Erweiterung der Pupille hier möglicherweise haben kann, ausschließt, habe ich zu bestimmen versucht, wie weit der Umstand, daß die Pupille bei schwachem Lichte sich bedeutend erweitert, für die Auffassung der relativen Helligkeitsverteilung im Spektrum einige Bedeutung hat. Es ist nun ziemlich sicher, daß die Pupillenerweiterung, theoretisch betrachtet, einen Einfluß hat, wovon man sich leicht durch folgendes Raisonnement überzeugen kann. Betrachtet man ein mit der Gesichtsachse paralleles zylindrisches Strahlenbündel, so wird — bei jeder beliebigen Größe der Pupille — das Strahlenbündel, das rote Farbenstrahlen hinter die Pupille hineinsenden kann, weniger umfangreich sein als jenes Strahlenbündel, das blaue Strahlen hinter die Pupille hineinsenden kann, weil die blauen Strahlen ja in der Cornea und im Humor aqueus stärker gebrochen werden als die roten. Dieser Unterschied ist jedoch, wenn die Pupille klein ist, nur gering, weil die mit der Gesichtsachse parallelen Strahlen, soweit sie durch die Pupille eindringen, die Cornea unter so kleinen Einfallswinkeln treffen werden, daß die Dispersion der Farbenstrahlen von Rot zu Blau unbedeutend sein wird. Im Finstern dagegen, wenn die Pupille stark erweitert ist, wird eine verhältnismäßig bedeutende Menge der Strahlen, die jetzt hinter die Pupille hineindringen, die Hornhaut unter viel größeren Einfallswinkeln treffen (siehe Fig. V).[1]) Dies wird eine größere Dispersion der verschiedenen Farbenstrahlen von Rot zu Blau zur Folge haben. Folglich werden die blauen Strahlen (die brechbarsten) bei der großen Pupille, wenn also das Auge dunkel adaptiert ist, ein relativ größeres Übergewicht über die roten erhalten als bei der kleinen Pupille. Dies ist ganz unbestreitbar, es ist vollkommen sicher, daß die Pupillenerweiterung, die in der Dämmerung oder überhaupt bei schwacher Beleuchtung eintritt, eine mitbestimmende Ursache des Purkinjeschen Phänomens, d. h., des Übergewichtes der blauen Farben über die roten ist. Es ist indessen ebenso sicher, daß das Übergewicht, das die blauen Strahlen bei Erweiterung der Pupille erhalten, sehr gering ist, so gering, daß die Erweiterung nicht in einem nachweisbaren Grade zur Hervorbringung von Purkinjes Phänomen beiträgt. Ich überzeugte mich

[1]) Bezeichnet $Sp \neq LOC$ den zu äußerst liegenden — mit der Gesichtsachse parallellaufenden — blauen Lichtstrahl, der in die Pupille eindringen kann bei deren Grenzpunkt ***m***, so sieht man, daß ein roter Strahl, der in der Richtung *Sp* hineinkommt und einen größeren Brechungswinkel hat, als der blaue Strahl, die Iris in einem Punkte ***r*** treffen wird, der außer der Pupille liegt.

davon, indem ich in das eine meiner Augen Atropin träufelte, was zur Folge hatte, daß die Pupille des Auges so sehr erweitert wurde, daß man nur einen sehr schmalen Rand von der Iris sah. Verglich ich nun bei gewöhnlichem Tageslicht die Farben, die ich sah, indem ich ein Spektrum abwechselnd mit dem einen Auge, wo die Pupille künstlich erweitert war, und mit dem andern Auge, das normal reagierte und somit bei Tageslicht eine kleine Pupille hatte, betrachtete, so war es mir nicht möglich, mit Sicherheit eine Verschiebung im Sinne des Purkinjeschen Phänomens zu konstatieren. Es ist möglich, daß eine minimale Helligkeitsverschiebung stattfand, wenn ich abwechselnd mit dem rechten und linken Auge sah, aber etwas Sicheres ließ sich hierüber nicht sagen. Die ganze Untersuchung der Bedeutung, die die Erweiterung der Pupille hat, ist also zunächst von theoretischem Interesse.



mm_1 = Radius der Pupille. i = der Einfallswinkel.
Cn = Normale zu p. β = der Brechungswinkel.
LOC = die verlängerte Augenachse. mt = Iris.

Fig. V.
Meridianschnitt durch die Cornea.

Die Kries-Parinaudsche Hypothese, die so viele andere fundamentale Eigentümlichkeiten bei den verschiedenen Farbensystemen erklärt hat, kann indessen auch auf eine, wie uns scheint, ganz überzeugende Weise das Purkinjesche Phänomen erklären.[1]) Weder Parinaud noch v. Kries und seine Mitarbeiter haben hinreichende Kenntnis von der Reizempfindlichkeit für gleich helle Farben

[1]) In Philos. Stud., 1902, Bd. 20, hat A. Lehmann Purkinjes Phänomen auf eine ganz andere Weise erklärt; diese Erklärung baut indessen auf Voraussetzungen, die nicht richtig sind (siehe Marbes treffende Kritik in Pflügers Archiv, 1903 Bd. 97, p. 360 f.), und es ist daher auch nicht wahrscheinlich, daß sie, wie Lehmann meint, als Stütze für Wundts Periodizitätstheorie dienen kann.

unabhängig vom benutzten Spektrum gehabt und deshalb auch nicht mit Zahlen beweisen können, daß ihre Auffassung des Purkinjeschen Phänomens richtig sei, aber sie haben nichtsdestoweniger durch sinnreiche Kombination von mancherorts gemachten Erfahrungen einen sehr schönen Wahrscheinlichkeitsbeweis für ihre Auffassung führen können. Dies geschieht von den verschiedenen Autoren auf etwas verschiedene Art, aber das Wesentliche ihres Gedankenganges kann man auf folgende Weise darstellen. Nimmt man an, daß unsere Farbenempfindungen durch das Zusammenwirken der Stäbchen und Zapfen entstehen, jedoch so, daß die Stäbchen nur bei sehr schwacher und die Zapfen nur bei sehr starker Beleuchtung allein wirken, so liegt die Vermutung nahe, daß wir bei schwacher Beleuchtung (innerhalb eines gewissen Intervalls) das Spektrum mit einer konstanten, von der Stäbchenwirksamkeit abhängigen Helligkeitsverteilung sehen werden, die wiederum von der Absorption im Sehpurpur abhängig ist, während wir bei starker Beleuchtung (ebenfalls innerhalb eines gewissen Intervalls) das Spektrum mit einer anderen, aber gleichfalls konstanten Helligkeitsverteilung sehen werden, die von der Zapfenwirksamkeit abhängig ist. Die Kries-Parinaudsche Theorie führt deshalb zu der Annahme, daß sowohl Stab- als Zapfenkurven, wie wir sie der Kürze halber nennen können, konstant, aber sonst voneinander verschieden sind, und schließt daraus, daß das Purkinjesche Phänomen entsteht, wenn die Stäbchen und die Zapfen, die jede ihre eigentümliche Helligkeitsverteilung zur Folge haben, bei mittelstarken Beleuchtungsstufen zusammenwirken. Diese Annahme wird durch verschiedene wichtige Erfahrungen auf so entscheidende Weise gestützt, daß ihre Richtigkeit kaum mehr bezweifelt werden kann. Es gibt nämlich zwei Argumente, die schwer widerlegt werden können, weshalb wir uns auch bei unserer Verteidigung dieser Auffassung daran halten wollen. Betrachtet man mit der Fovea allein ein Spektrum, das so lichtstark ist, daß es gerade an der Grenze liegt, die von der Blendungsschwelle angegeben wird, so sieht man das Helligkeitsmaximum in Gelb; läßt man nun die Lichtstärke des Spektrums sukzessiv abnehmen, indem man beständig nur mit der Fovea allein sieht, so macht man die eigentümliche Beobachtung, daß das Purkinjesche Phänomen selbst nach der am weitesten getriebenen Adaptation gar nicht auftritt. Man kann die Beleuchtung herabsetzen, so weit man will; man sieht das Spektrum mit derselben Lichtverteilung (das Maximum in Gelb), bis die Farben verschwinden, ohne — wie wir früher gesagt haben — zuerst gräulich zu werden. Da nun in der Fovea nur Zapfen sind,

können wir daraus schließen, daß es kein Purkinjesches Phänomen geben würde, wenn die Zapfen allein wirkten, wenn also die peripherischen Teile der Retina anatomisch gebaut wären wie die Fovea. Die Kurve, die wir früher die Zapfenkurve nannten, muß kraft dieses Versuches als konstant, d. h. als ganz unabhängig von wechselnder Beleuchtung, angenommen werden; das Spektrum wird mit derselben Helligkeitsverteilung gesehen, und das Helligkeitsmaximum fest in Gelb liegend. — Aber nicht bloß die Zapfenkurve ist konstant, dasselbe gilt auch von der Stabkurve. Davon können wir uns überzeugen, wenn wir die Totalfarbenblinden untersuchen. Hering, der das Purkinjesche Phänomen bei Totalfarbenblinden ohne die mindeste Rücksicht auf die Kries-Parinaudsche Theorie untersuchte, kam zu dem Resultate, daß man bei den Totalfarbenblinden kein Purkinjesches Phänomen finde.[1]) Sie sehen das Spektrum mit derselben Helligkeitsverteilung bei schwacher und stärkerer Beleuchtung (sehr starke Beleuchtung können diese Farbenblinden ja nicht ertragen — siehe die Erklärung desselben oben). Das Helligkeitsmaximum liegt fest im Grün. Da wir, wie früher hervorgehoben, aus vielen Gründen annehmen können, daß die Totalfarbenblinden nur Stäbchen haben, so folgt daraus, daß die Stabkurve auch konstant, d. h. unabhängig von Beleuchtungsvariation, sein wird. Wir müssen daher annehmen, daß die Helligkeitsverschiebung, die wir Purkinjes Phänomen nennen, auftritt, wenn Stäbchen und Zapfen zugleich wirken; man erhält dann bei mittelstarker Beleuchtung eine Reihe Übergangskurven zwischen der Stab- und Zapfenkurve, also Kurven, bei denen das Helligkeitsmaximum zwischen Gelb und Grün liegt. Ist die Beleuchtung stärker, so wird das Maximum sich dem Gelben nähern, d. h. die Stabwirksamkeit ist schwach; ist jene schwächer, so wird das Maximum sich dem Grünen nähern, weil dann die Stabkurve zur dominierenden wird.[2]) — Diese Erslärung des Purkinjeschen Phänomens wird noch wahrscheinlicher, wenn man Fig. IV betrachtet. Wie oben gesagt, haben wir hier zwei Kurvengruppen, eine bei starker und eine andere bei schwacher Beleuchtung, und zwischen diesen Kurvengruppen liegen, mittel--tarker Beleuchtung entsprechend, Übergangskurven, die deutliche Spuren davon an sich tragen, daß man sie sich als durch eine

---

[1]) Pflügers Archiv, Bd. 49, p. 595.

[2]) Für die Richtigkeit dieser Anschauung spricht auch der Umstand, daß die bläulichen Farben zwar in der Dämmerung hervortretender (heller), zugleich aber auch weniger gesättigt (blau-grau) werden. Das stimmt gut mit einer Theorie überein, die annimmt, daß die Stäbchen, der Neutralapparat, einen immer größeren Einfluß gewinnt, je mehr die Beleuchtung herabgesetzt wird.

Art Interferenz zwischen den äußersten Kurven entstanden denken kann.

Daß die Stabkurve gerade die in Fig. IV angegebene Form hat (siehe die Kurven *S*, *A*, *B*, und *C*), wurde ja früher aus ihrer Übereinstimmung mit der Absorptionskurve für den Sehpurpur zulänglich erklärt, dagegen haben wir vorläufig kein Mittel, zu entscheiden, warum die Zapfenkurve gerade die in Fig. IV angegebene Form hat (siehe die Kurven *H*, *G* und zum teil auch *F*). Wir sind ganz unwissend darüber, worin die Ursache dafür liegt, daß die Zapfenkurve das Maximum im Gelb hat, und es scheint, man müsse, um dies zu erklären, ganz neue und unbekannte Wege einschlagen. Die naheliegende Annahme, daß die Zapfenkurve gleichwie die Stabkurve durch die Absorption in irgend einem Farbstoffe bestimmt werden sollte, der also als vom Sehpurpur verschieden (blau?) angenommen werden müßte, scheitert an der bestimmten Tatsache, daß man trotz aller angewandten Mühe (und es ist viel Mühe darauf verwendet worden), nicht die geringste verläßliche Spur eines solchen Farbstoffes gefunden hat. Die farbigen Ölkugeln, wovon man so oft spricht, sind wohl von sekundärer Bedeutung und stehen wahrscheinlich ganz im Dienste der Ernährung. Diese farbigen Ölkugeln können nicht in eine Linie mit dem Sehpurpur gestellt werden; sie treten ziemlich sporadisch und in sehr verschiedener Weise auf und sind übrigens im Menschenauge sogar in sehr geringer Anzahl. Der Umstand, daß die Zapfen beim Übergang vom Licht zum Dunkel sich ganz enorm ausdehnen,[1]) könnte es übrigens wahrscheinlich machen, daß wir hier vor einem elektrischen Phänomen stehen, aber etwas bestimmtes kann man darüber nicht sagen.

Da die Dichromaten — an der Schwelle — dieselbe Reizempfindlichkeit haben wie die Normalsehenden und die Totalfarbenblinden (siehe oben), kann man daraus schließen, daß ihre Stabkurve von der normalen nicht abweicht; die Farbenauffassung in der Dämmerung muß also bei den Dichromaten als von der Stabwirksamkeit bedingt betrachtet werden, die wiederum von der Absorption im Sehpurpur abhängig ist. Dagegen können wir annehmen, daß die Zapfenkurve der Dichromaten von der normalen abweicht.[2]) Das Purkinjesche Phänomen, das auch bei den

---

[1]) Ein Zapfen, dessen Länge bei gewöhnlichem Tageslicht 5 μ ist, dehnt sich im Finstern bis zu 50 μ aus; siehe Engelmanns Abhandlung in Pflügers Archiv, 1885, Bd. 35, p. 498—508. Die Maße sieht man für ganz verläßlich an. Die Entdeckung hat man übrigens van Gendern Stort zu verdanken.

[2]) Dasselbe gilt, obzwar in viel geringerem Grade, wahrscheinlich auch von den sog. „anormalen Trichromaten", die von Raleigh besprochen werden.

Dichromaten sehr deutlich auftritt, muß daher als abhängig gedacht werden von einem Zusammenwirken zwischen einem Stabapparat, der wie bei den Normalen (und Totalfarbenblinden) ist, und einem vom normalen abweichenden Zapfenapparat, und wir müssen außerdem annehmen, daß die Zapfenkurve bei den verschiedenen Dichromaten — rot- und grünblinden — etwas verschieden ist. — Solange man nichts davon weiß, warum die Zapfenkurve bei Normalen gerade die bestimmte Form hat, wie wir sie z. B. in Kurve *H*, Fig. IV, finden, wird ein Erklärungsversuch, warum die Zapfenkurve bei den Dichromaten und den anormalen Trichromaten in typischer Weise von der Zapfenkurve bei Normalsehenden abweicht, wahrscheinlich aussichtslos sein.

Wir wollen nur noch mit Rücksicht auf die ganze Anschauung, die hier geltend gemacht wurde, darauf aufmerksam machen, daß Herings Schule leugnet, daß das Purkinjesche Phänomen in der Fovea fehlt. Hierauf kann man nur sagen, daß es sehr schwer ist, mit der Fovea allein zu sehen, und daß eine spezielle Versuchsanordnung leicht zu unbrauchbaren Resultaten führen kann. Es ist auch bemerkenswert, daß die Heringsche Schule in diesem Punkte fast vollkommen isoliert dasteht[1]); man hat sich von dieser Seite nur schwer mit der hier behaupteten Auffassung des Purkinjeschen Phänomens versöhnen können, was leicht erklärlich ist, da Herings Farbentheorie in ihrer gewöhnlichen Formulierung hiermit steht und fällt. Zur Beleuchtung dieser Frage ist es übrigens von Bedeutung, auf eine Beobachtung hinzuweisen, die v. Kries gemacht hat (s. Zeitschr. usw. Bd. 9, 1896, p. 85, Anm.): „Aus dem Fehlen des Purkinjeschen Phänomens für Netzhaut-Zentrum erklärt sich auch eine Erscheinung, die mir seit Jahren bekannt war, ohne daß ich ihr die Beachtung geschenkt hätte, die sie wohl verdiente. Als ich nämlich zuerst das Purkinjesche Phänomen in der Vorlesung demonstrieren wollte, fiel mir auf, wie schlecht dasselbe von den hinteren Bänken des Hörsaales aus zu sehen war. Es zeigte sich bald, daß die Farbenfelder für die ziemlich große Entfernung zu klein waren, und ich fand es notwendig, um die Erscheinung recht deutlich zu machen, den blauen und roten Farben größere Ausdehnung zu geben . . . . in der Tat ist die Größe des Gesichtsfeldes nur deswegen von Einfluß auf die Erscheinung, weil bei größeren Feldern eben stets Seitenpartien der Netzhaut mit ins Spiel kommen. Das kleine Feld verhält sich anders, nur wenn es fixiert wird, aber ebenso wie das große, wenn man es indirekt betrachtet."

[1]) Die abweichenden Resultate bei Schermann, Philos. Studien, Bd. 13, sind einer ungeschickten Versuchsanordnung zu verdanken.

Der Umstand, daß man bisher keine durchgeführte quantitative Bestimmung für das Purkinjesche Phänomen gehabt hat, die vom benutzten Spektrum unabhängig gewesen wäre, hat vielleicht bewirkt, daß v. Kries und seine Mitarbeiter die vorliegenden Bestimmungen zu einer quantitativen Verifikation ihrer Hypothese nicht in genügendem Grade benutzt haben. Da es indessen wichtig sein wird, in unserer Auffassung des Purkinjeschen Phänomens eine noch größere Sicherheit zu erhalten, wollen wir von Tabelle XI ausgehen, wo Königs Versuchsresultate in retinale Energie umgerechnet sind, um einen Approximationsbeweis für die Kries-Parinaudsche Theorie zu suchen. Wir wollen annehmen, daß die *H*-Reihe (Tabelle XI und Fig. IV) der Zapfenkurve und die *A*-Reihe der Stabkurve entspricht[1]. Nach der Kries-Parinaudschen Theorie werden dann die zwischen *A* und *H* liegenden Kurven durch ein Zusammenwirken zwischen der *S*- und *H*-Kurve entstehen, und wir würden deshalb, wenn wir das Gesetz für dieses Zusammenwirken kennen würden, dazwischenliegende Kurven wie *d* und *e* durch Berechnung finden und daraus sehen können, wie groß die Übereinstimmung zwischen den durch Berechnung gefundenen Kurven *d* und *e* und den durch Beobachtung gefundenen Kurven *D* und *E* ist. Bevor wir dies zu tun versuchen, bevor wir also versuchen, die Auffassung des Purkinjeschen Phänomens, die hier geltend gemacht wurde, mit Hilfe einer Formel für dasselbe zu verifizieren, wird es doch notwendig sein, darauf aufmerksam zu machen, daß man billigerweise an eine solche Verifikation nicht recht große Forderungen stellen kann. Es wird nämlich bei den Berechnungen notwendig sein, von der Voraussetzung auszugehen, daß sowohl die *A*- als die *H*-Kurve ideal ist, d. h. die wahren Werte für die Stab- und Zapfenkurve angeben; man kann nicht sagen, daß dies der Fall ist, da König angibt, daß er bei seiner Bestimmung äquiluzider Farben Fehler von ca. 5 % macht. Man kann sogar voraussetzen, daß die Fehler eher größer gewesen sind an den Grenzen, d. h. bei höchster und niedrigster Beleuchtung, *H* und *A*. Außerdem sollen die Werte, die wir mit Hilfe einer Formel für die *d*- und *e*-Kurven (entsprechend der Beleuchtung *D* und *E*) finden, mit den für die Beleuchtung *D* und *E* (die Kurven *D* und *E*) gefundenen Werten verglichen werden, und diese versuchsweise gefundenen Werte sind

[1] Wir ziehen es vor, die *A*- und nicht die *S*-Reihe zu benutzen, da durch Bestimmungen an der Schwelle sich besonders große Fehler einschleichen. Die Fehler werden kleiner, wenn die Beleuchtung, d. h. die Stärke des Vergleichslichtes etwas wächst. Übrigens berechtigt uns die große Übereinstimmung zwischen der *A*- und *S*-Reihe dazu, *A* als Repräsentanten für die Stabkurve zu wählen.

auch mit Fehlern behaftet, die mindestens zu 5 % angeschlagen werden müssen. Dazu kommen die Ungenauigkeiten, die sich bei Umrechnung von Quantitätsbestimmungen aus Spaltbreite in retinale Energie unzweifelhaft einschleichen. Man kann gewiß ziemlich sicher darauf bauen, daß sich in der Energiekurve des Hefnerlichtes, die wir ja zugrunde gelegt haben, keine Fehler finden, die bei diesen Untersuchungen von Bedeutung wären, aber dasselbe gilt kaum von der Kurve für die elektive Absorption in der Macula. Man kann also a priori davon ausgehen, daß von einer guten, geschweige denn feinen Verifikation der Hypothese wird nicht die Rede sein können. Die Formel, die wir prüfen wollen, sieht so aus:

$$\frac{1}{P_e} = m\frac{1}{P_H} + n\frac{1}{P_A},$$

m und n sind Konstanten, P_H und P_A haben die früher angenommene Bedeutung (s. Tabelle XI); P_H ist also die Energie, die bei Benutzung des Vergleichslichtes H angewandt werden soll, damit wir die Farben des Spektrums gleich hell sehen sollen; und $\frac{1}{P_A}$ die Energie, die angewandt werden muß, damit wir, wenn das Vergleichslicht A ist, äquiluzide Farben sehen sollen. P_e ist der nach der Formel gefundene Wert für die Reizempfindlichkeit bei der Beleuchtung E; $\frac{1}{P_e}$ wird also die Energie, die wir brauchen, damit wir beim Vergleichslicht E gleich helle Farben sehen sollen; diese Größe ist es, die wir durch Berechnung finden wollen, um sie mit $\frac{1}{P_E}$ (den reziproken Werten von $\frac{1}{P_E}$, die P_E-Werte sind in Tabelle XI angeführt) zu vergleichen. Aus der Gleichung $\frac{1}{P_e} = m\frac{1}{P_H} + n\frac{1}{P_A}$ können wir die Konstanten m und n finden, indem wir bei verschiedener Wellenlänge sukzessive die Werte von $\frac{1}{P_H}$ und $\frac{1}{P_A}$ einsetzen. Wir stellen diese Probe nur für Farben an, die zwischen $\lambda = 590$ und $\lambda = 490$ liegen; die Farben, welche weniger brechbar sind als 590, die Farben von 590—670, sind nämlich in der Tabelle für Reizempfindlichkeit (XI) mit so kleinen Zahlenwerten bezeichnet, daß ein kleiner Fehler in der 3., ja selbst in der 4. Dezimale von entscheidender Bedeutung wird, wenn die reziproken Werte $\frac{1}{P_H}$ und $\frac{1}{P_A}$ in die Formel eingesetzt werden. Auf der andern Seite können wir unsere Untersuchungen nicht weiter ausdehnen als bis 490, da die H-Reihe bei König nicht weiter durchgeführt ist[1]). — Die Tabellen XII und

[1]) König mußte mit seinen Untersuchungen des Purkinjeschen Phänomens bei 490 aufhören, weil die blauen und violetten Farben in seinem Spektrum eine geringere Lichtstärke hatten, als das Vergleichslicht H.

XIII zeigen die mit Hilfe der Formel gefundenen Werte für $\frac{1}{P_e}$ und $\frac{1}{P_d}$[1]). Man sieht aus diesen zwei Tabellen, daß die Fehler, wenn man auf die Genauigkeit Rücksicht nimmt, die wir hier zu erreichen hoffen können, nicht sehr bedeutend sind. Man bemerkt jedoch, daß in der Fehlerverteilung eine gewisse Regelmäßigkeit vorhanden ist; diese Regelmäßigkeit rührt vielleicht von einer ungenügenden Adaptation her. Königs Versuche sind hinsichtlich der Adaptation nicht ganz ideale gewesen, etwas, was Hering stark, ja zweifelsohne allzu stark kritisiert hat[2]).

Tabelle XII.

λ	$\frac{1}{P_E}$	$\frac{1}{P_e}$	$\frac{1}{P_e} \div \frac{1}{P_E}$
590	1,220	1,360	+ 0,140
575	1,075	0,953	÷ 0,122
555	1,010	0,821	÷ 0,189
535	1,000	0,843	÷ 0,157
520	1,099	0,999	÷ 0,100
505	1,316	1,327	+ 0,011
490	1,852	2,014	+ 0,162

Tabelle XIII.

λ	$\frac{1}{P_D}$	$\frac{1}{P_d}$	$\frac{1}{P_d} \div \frac{1}{P_D}$
590	1,961	2,191	+ 0,230
575	1,515	1,266	÷ 0,249
555	1,220	0,903	÷ 0,317
535	1,053	0,806	÷ 0,247
520	1,000	0,869	÷ 0,131
505	1,064	1,085	+ 0,021
490	1,333	1,585	+ 0,252

Wir haben diese Berechnungen nur für zwei Beleuchtungen, *D* und *E*, durchgeführt, da die andern zwischen *A* und *H* liegenden Kurven sich so genau an die Außenkurven, die Stab- und Zapfenkurve anschließen.[3])

Die Berechnung der Konstanten *m* und *n* haben wir indessen für alle Kurven durchgeführt, die zwischen der *H*- und *A*-Kurve liegen. Werden die Zahlen für $\frac{m}{n}$ durch eine Kurve graphisch repräsentiert, sieht man, daß die Kurve ziemlich regelmäßig und glatt ist, was wohl auch für die Richtigkeit der ganzen Betrachtung spricht.

Da wir früher die Reizempfindlichkeit für Farben mit gerade unterscheidbarer spektraler Qualität bestimmten (P_s Tabelle IX), wurde angedeutet, daß diese Werte wahrscheinlich von der Zapfenwirksamkeit abhängig sind. Diese Ver-

---

[1]) Die Werte für $\frac{1}{P_d}$ findet man auf analoge Weise nach der Formel: $\frac{1}{P_d} = m\frac{1}{P_H} + n\frac{1}{P_A}$.

[2]) Siehe Pflügers Archiv, 1895, Bd. 60.

[3]) Eine Berechnung wird hier erst möglich werden, wenn die Kurven (und zwar namentlich *A* und *H*) einmal mit einer ganz anderen Präzision bestimmt werden.

Tabelle XIV.

	B	C	D	E	F	G
$m =$	0,123	0,224	0,410	0,590	0,802	0,895
$n =$	0,766	0,563	0,231	0,098	0,041	0,020
$\frac{m}{n} =$	0,161	0,398	1,777	6,047	19,561	44,750

mutung können wir jetzt bekräftigen, indem wir die für P_s gefundenen Werte mit den Werten, die wir hier als Zapfenwerte betrachtet haben, vergleichen. Vergleicht man die Werte für P_s mit P_H, P_G und P_F, so sieht man, daß doch eine gewisse Übereinstimmung ist. Mehr konnten wir auch nicht erwarten, da die Bestimmung von P_s (selbst wenn wir von den Ungenauigkeiten, die hier bei Energieumrechnung entstehen können, absehen) ja sehr schwer ist, so schwer, daß die für P_s gefundenen Werte eigentlich nur einen vorläufigen Überblick über die Reizempfindlichkeit für Farben mit spektraler Qualität geben und in keiner Weise als definitiv betrachtet werden können.

Die Theorie der sekundären Schichten.

Wenn wir die Kries-Parinaudsche Hypothese mit Rücksicht auf obige Entwickelungen als verifiziert betrachten, werden wir das Problem mit gutem Grunde noch weiter verfolgen und deshalb untersuchen, warum denn die Stäbchen und Zapfen in der Retina auf so verschiedene Weise wirken, daß die Stäbchen uns nur einen neutralgefärbten Eindruck geben, während die Zapfen zugleich die Auffassung von Farben mit spektraler Qualität ermöglichen. — Es könnte nahe liegen, anzunehmen, daß die verschiedene Wirksamkeit dieser Elemente der Verschiedenheit zwischen den Stäbchen und Zapfen selbst zu verdanken sein dürfte, aber diese Annahme erweist sich als unhaltbar. Zwar ist wohl ein bedeutender Unterschied zwischen den Stäbchen und Zapfen, und man kann außerdem darauf hinweisen, daß die Stäbchen allein von Sehpurpur umgeben sind, daß die Zapfen bei Lichteinwirkung sich kontrahieren u. a., aber diese Verschiedenheiten zwischen den Stäbchen und Zapfen untereinander können es doch nicht erklären, daß uns die Zapfenwirksamkeit so viele verschiedene Empfindungen gibt, während die Stabwirksamkeit nur die Empfindung von Weiß und Grau hervorruft. Wir wollen daher versuchen, eine andere Erklärung für die funktionelle Überlegenheit der Zapfen zu finden,[1]) und es scheint da am Platze zu sein, von der Annahme auszu-

[1]) Vom histogenetischen Standpunkte kann man den Zapfen als ein höher entwickeltes Stäbchen betrachten (siehe Gräfe-Sämisch, Handbuch usw., p. 124).

gehen, daß die Verbindung der Zapfen mit den Ganglienzellen der Retina bedeutend komplizierter sein muß, als die Verbindung der Stäbchen mit ihren Ganglienzellen. Diese Annahme wird zweifellos bekräftigt durch die neueren anatomischen Untersuchungen der Retina, die uns wertvollen Beistand leisten, wenn wir die funktionelle Überlegenheit und vielseitige Wirksamkeit der Zapfen zu erklären wünschen. Wir stellen also hier als Thesis die Behauptung auf, daß der Unterschied zwischen der Wirkungsweise der Stäbchen und der Zapfen wesentlich bedingt ist von der verschieden ge-

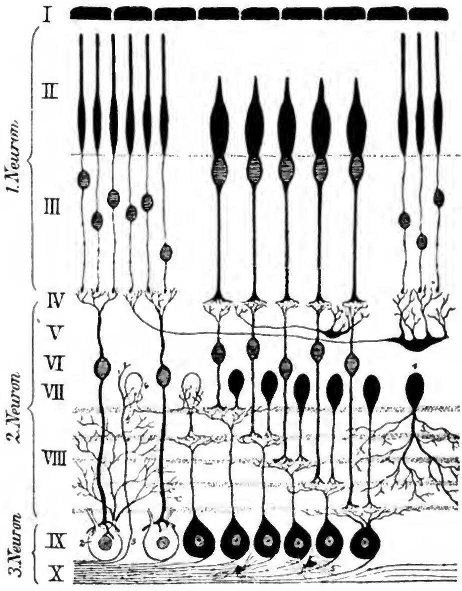


Fig. VI.

Erklärung zu Fig. VI, die aus Gräfe-Sämisch' Handb., p. 86, genommen ist:

I. Pigmentepithelschicht.
II. Stab-Zapfenschicht.
III. Korn der Sehzellen.
IV. Äußere plexiforme Schicht.
V. Schicht der horizontalen Zellen.
VI. Schicht der bipolaren Zellen.
VII. Schicht der amakrinen Zellen.
VIII. Die innere plexiforme Schicht.
IX. Ganglienzellenschicht.
X. Nervenfädenschicht.

arteten Verbindung dieser Elemente mit den Gangl enzellen der Retina, und untersuchen deshalb diese Verbindung näher.

Man ist oft dazu geneigt gewesen, die Stäbchen und Zapfen als selbständige Sehelemente aufzufassen. Dagegen kann folgendes eingewendet werden. Die Stäbchen und Zapfen stehen nicht in unmittelbarer Verbindung mit den Ganglienzellen der Netzhaut, und man hat deshalb Grund, anzunehmen, daß die tiefer gegen das Zentralorgan liegenden Schichten der Retina auch für die Farbenauffassung von wesentlicher Bedeutung sind. Man wird m. a. W. Grund dazu haben, die Stäbchen und Zapfen nicht als selbständige Sehelemente zu betrachten, sondern als die am meisten peripherisch liegenden Teile eines zusammengesetzten, komplizierten Sehapparates. Daß die Kriessche Farbentheorie auf eine solche Weise suppliert werden kann, ist ein Gedanke, der in der neuesten Zeit ihren Verteidigern nicht fremd ist, ohne daß man sich doch bisher von dieser Seite näher darüber ausgesprochen hat, welche Bedeutung man mit Grund jenen Schichten der Retina beilegen kann, die zwischen den Stäbchen und Zapfen auf der einen und den Ganglienzellen auf der anderen Seite liegen.

Die Stäbchen und Zapfen liegen in der Netzhaut am weitesten nach außen in derselben konzentrischen Schicht, und können als speziell geformte, nach außen gehende Ausläufer von den Stab- und Zapfenzellen betrachtet werden (siehe Fig. VI).[1]) Diese Zellen, die Stäbchen-Zapfenzellen, haben indessen auch nach innen gehende Ausläufer, und diese Ausläufer enden in ein und derselben konzentrischen Schicht, die sog. äußere plexiforme Schicht. In dieser Schicht endigen die Stäbchen mit einem kleinen Knoten, die Zapfen mit einer kegelförmigen Erweiterung. Diese Endgeräte der Stäbchen und Zapfen stehen nun in Kontiguitätsverbindung mit den sog. bipolaren Zellen — oder genauer mit den nach außen gewendeten Ausläufern der bipolaren Zellen. Die bipolaren Zellen und ihre nach innen und nach außen gerichteten Ausläufer liegen auch in einer konzentrischen Schicht in der Netzhaut. Innerhalb dieser Schicht folgt dann die verhältnismäßig ausgedehnte innere plexiforme Schicht, auf die wieder nach innen die Ganglienzellenschicht folgt. Diese wird insgemein als ein peripherisch gelegener Teil des Zentralnervensystems aufgefaßt. Die bipolaren Zellen bilden also das Bindeglied zwischen den Stäbchen und Zapfen auf der einen und den Ganglienzellen auf der anderen Seite, und wir kommen hier zu dem Umstand, was den Unterschied zwischen der Funktion der Stäbchen und der Zapfen mehr verständlich macht, indem es sich nämlich zeigt, daß die bipolaren Zellen die Stäbchen und Zapfen auf verschiedene Weise mit den Ganglienzellen verbinden. In bezug auf die Stäbchen wird die Verbindung mit den Ganglienzellen auf folgende Weise erreicht: Die Bipolarzellen, die zu den

[1]) Die Bezeichnungen „nach außen" und „nach innen" beziehen sich sowohl hier als im folgenden auf den Mittelpunkt des Augapfels; daß die Stäbchen und Zapfen am weitesten nach außen in der Netzhaut liegen, wird also sagen, daß sie am weitesten vom Mittelpunkte des Augapfels abliegen.

Stäbchen gehören, durchbrechen mit ihren nach innen gehenden Ausläufern die große innere plexiforme Schicht (siehe Fig. VI) und spalten sich dann in Verzweigungen, die mit einer einzelnen Ganglienzelle in Kontiguitätsverbindung[1]) steht. Die Bipolarzellen der Stäbchen haben also mit der inneren plexiformen Schicht gar nichts zu tun, indem sie es nur durchbrechen, ohne damit in Verbindung zu treten. Ganz anders verhält es sich mit den nach innen gehenden Ausläufern aus den Bipolarzellen der Zapfen. Indem ein solcher Ausläufer in die innere plexiforme Schicht eintritt, hält er plötzlich in seinem Vorrücken in dieser Schicht inne und sendet winkelrecht auf seiner ursprünglichen Richtung zahlreiche Verzweigungen aus, die sich in der Regel konzentrisch den andern Schichten der Netzhaut halten. Einige von den Bipolarzellen der Zapfen senden diese konzentrischen Verzweigungen gleich nach ihrem Eintreten in die innere plexiforme Schicht aus, andere senden ihre Verzweigungen etwas weiter drinnen aus, wieder andere noch etwas weiter drinnen und so weiter. Auf diese Weise werden in dieser Schicht, der inneren plexiformen Schicht, mindestens vier, wahrscheinlich aber noch mehr sekundäre Schichten gebildet. Cajal nimmt — jedoch nach einigem Wanken — an, daß seine Untersuchungen es höchst wahrscheinlich machen, daß es fünf solche Schichten gibt.[2]) Diese scharf markierte sekundäre Schichtenteilung im inneren plexiformen Stratum muß unzweifelhaft eine physiologische Bedeutung haben, und da die Bipolarzellen der Stäbchen die innere plexiforme Schicht nur einfach hier durchbrechen, während die Bipolarzellen der Zapfen durch ihre Verzweigungen für die sekundäre Schichtenteilung entscheidend sind, so wird es ganz natürlich sein, der inneren plexiformen Schicht eine wesentliche Bedeutung für die Zapfenwirksamkeit, also für die Auffassung von Farben mit spektraler Qualität, zuzuschreiben. Daß die innere plexiforme Schicht mit ihrer sekundären Teilung für die Funktion der Zapfen von Wichtigkeit ist, scheint auch aus Cajals Auslassungen hervorzugehen (lib. cit. pag. 129). Hier wird nämlich hervorgehoben, daß von den Ganglienzellen, die mit den Bipolarzellen in Verbindung stehen, nach außen gehende Ausläufer ausgehen, die in die innere plexi-

---

[1]) Die Kontiguitätstheorie wird in der neuesten Zeit von Apathy und Bethe bestritten (siehe hierüber z. B. A. Hoche: Die Neuronenlehre und ihre Gegner, 1899), die doch bei mehreren hervorragenden Physiologen großem Widerstande begegnet sind (siehe Edingers Rezension von Nißls Buch: Die Neuronenlehre und ihre Anhänger, Zeitschr. usw. 1904, p. 275 f.).

[2]) S. Cajal, Retina der Wirbeltiere, p. 55: „Nach einigem Zögern kann ich nunmehr deren fünf zugeben......... Es könnte aber wohl sein, daß eine noch größere Anzahl ..... vorhanden ist.“

forme Schicht eindringen und dort sich in konzentrische Verzweigungen spalten, die bald tiefer, bald weniger tief in die innere plexiforme Schicht eindringen. Per principium exclusionis kann man übrigens auch der sekundären Schichtenteilung eine wesentliche Bedeutung bei der Hervorrufung der verschiedenen Farbenempfindung beimessen, weil man nirgends anders in der Retina anatomische Formgruppierungen findet, die die Möglichkeit einer so differenzierten Wirksamkeit andeuten könnten wie die, welche annehmbarerweise erfordert wird zur Auffassung der verschiedenen Spektralfarben.

Wir gehen nun hypothetisch davon aus, das jede einzelne der sekundären Schichten eine wesentliche Bedeutung für eine einzelne Spektralfarbe hat, und untersuchen zunächst, ob es nicht möglich sein sollte, eine oder mehre der spektralen Farben in den sekundären Schichten des inneren plexiformen Stratums zu placieren (d. h. ihre Entwickelungsstelle anzugeben). Um hierüber eine berechtigte Vermutung aussprechen zu können, wird es indessen notwendig sein (mit der retinalen Anatomie als Leitfaden) zu untersuchen, welche Bedeutung man den Farbenempfindungen beilegen kann, die entstehen, wenn man elektrische Ströme von verschiedener Stärke und in verschiedener Richtung durch das Auge leitet.

Trotz zahlreicher Uneinigkeiten unter den Autoren, die auf diesem Gebiete gearbeitet, die also galvanische Farbenempfindung untersucht haben, scheinen sie doch in ihrer Angabe der Bedingungen, unter denen ein neutralfarbiger Eindruck entsteht, einig zu sein. Es scheint gar keinem Zweifel zu unterliegen, daß eine Lichtverstärkung hervorgerufen wird, wenn der angewandte Strom aufsteigend ist, d. h. wenn ein positiver elektrischer Strom vertikal auf die Retina in der Richtung von der Ganglienzellenschichte zur Stäbchen-Zapfenschichte eintritt. Eine Verdunkelung wird dagegen hervorgerufen durch einen absteigenden Strom, d. h. durch einen positiven Strom in entgegengesetzter Richtung. Dieses Phänomen hat Helmholtz mit Hilfe des Gesetzes vom Elektrotonus erklärt. Wenn der Strom durch die Retina, sagt er, aufsteigend ist, so wird Katelektrotonus (vermehrte Irritabilität) an der Kathode eintreten, wo der positive Strom austritt, also an der Stäbchen-Zapfenschichte, und das wird eine vermehrte Lichtempfindung zur Folge haben. Geht der Strom dagegen in entgegengesetzter Richtung, d. h. in der Richtung von der Stab-Zapfenschichte zur Nervenfädenschichte (der absteigende Strom), so wird die Stab-Zapfenschichte jetzt an der Anode liegen, also Anelektrotonus (verringerte Irritabilitat) bekommen, und dadurch

wird eine Verdunkelung des Gesichtsfeldes entstehen. Sind die Ströme schwach, so wird in der Regel — bloß nach der verschiedenen Richtung des Stromes — entweder eine Lichtverstärkung oder eine Lichtverringerung hervorgerufen, aber es treten keine spektralen Farbenempfindungen auf.

Nach der aufgestellten Theorie, die der inneren plexiformen Schicht mit ihrer sekundären Teilung eine entscheidende Bedeutung für die Auffassung von Spektralfarben beilegt, will das offenbar besagen, daß schwache Ströme nur neutrale Farbenempfindungen hervorrufen, weil der Katelektronus — eben auf Grund der geringen Stärke der Ströme — nicht in die innere plexiforme Schicht hineingelangt und deshalb auch keine spektralen Farbenempfindungen hervorruft. — Während also schwache Ströme nur Neutralfarben hervorrufen, werden sich, wenn die Stromstärke etwas erhöht wird, spektrale Farben zeigen. Jene Autoren, die diese Farbenempfindungen, die sog. „galvanischen Farbenempfindungen", untersucht haben, sind lange Zeit so ziemlich uneinig darüber gewesen, welche Spektralfarben man unter den gegebenen Bedingungen sieht. Der bekannte Psychophysiker G. E. Müller hat deshalb sich bedeutendes Verdienst erworben, indem er zuerst ausführlich und in sehr scharfsinniger Weise die Fehlerquellen, die sich geltend machen, erklärte und sodann feststellte, welche Spektralfarben man eigentlich bei verschiedenartiger Galvanisierung des Auges sieht.[1])

Bei diesen Untersuchungen wurde G. E. Müller von vielen (26) Versuchspersonen unterstützt, lauter intelligenten und den akademischen Kreisen angehörenden Leuten, und er kam dadurch im wesentlichen zu demselben Resultate, wie früher Purkinje, Schelske, Schliephake und Schwarz — im Gegensatz zu Ritters, Ruetes, Brenners und Brunners abweichenden Resultaten, die G. E. Müller nach einer ausführlichen Kritik der Versuchsmethoden dieser letztgenannten Autoren zurückweist. Es ist kein Grund dazu, hier bei den vielen speziellen Verhältnissen, die G. E. Müller in der genannten Abhandlung bespricht, uns aufzuhalten, namentlich in Anbetracht dessen, daß Helmholtz[2]) eine Erklärung der Phänomene geliefert hat, die mit der G. E. Müllers nahe verwandt ist. Wir wollen deshalb nur durch ein einzelnes Beispiel andeuten, welch komplizierten Fakta wir hier gegenüber gestellt werden können: Bringt man die positive Elektrode am äußeren Augenwinkel des rechten

---

[1]) Siehe G. E. Müllers ausgezeichnete Abhandlung in Zeitschr. usw. 1897, Bd. 14. p. 329—374.

[2]) Physiol. Optik. Ausg. II, p. 246 f.

Auges und die negative Elektrode im Nacken an, so wird der Strom im nasalen Teile der Netzhaut aufsteigend sein, d. h. von der Nervenfädenschicht zur Stab-Zapfenschicht gehen, während er im temporalen Teile der Netzhaut absteigend sein, d. h. von der Stab-Zapfenschicht zur Nervenschicht gehen wird. Dies wird zur Folge haben, daß das rechte Auge nach außen den Eindruck einer Lichtverstärkung mit einer bläulichen Farbe erhält und zugleich nach innen eine Verdunkelung mit gelblicher Farbe sieht. Man versteht durch dieses Beispiel allein, wie leicht es geschehen kann, daß eine Versuchsperson unsicher wird, wenn sie die Frage beantworten soll, welche Farbe sie sehe.

Trotz der bedeutenden Schwierigkeiten, die sich also geltend machen und die Versuchspersonen auf Irrwege führen können, findet sich doch bei Müllers Versuchspersonen eine durchaus überwiegende Norm, und wir wollen nun diese beschreiben.

Bei schwachen Strömen sehen Müllers Versuchspersonen nur die Phänomene, die Helmholtz erklärt hat, d. h. Lichtvermehrung oder Lichtverringerung. Wird die Stärke des aufsteigenden Stroms etwas erhöht, so wird man indessen nach Müllers Angabe blau sehen. Das will, wenn wir von der angenommenen Hypothese ausgehen, sagen, daß der Katelektrotonus jetzt auf Grund der erhöhten Stromstärke sich weiter vorwärts (hinein) schieben wird in der Richtung zu den Ganglienzellen und weiter hinein in die äußerste Partie der inneren plexiformen Schicht. Wir können deshalb annehmen, daß die äußerste der sekundären Schichten im inneren plexiformen Stratum der Entwicklungsort für blau ist. Versucht man die Stärke des aufsteigenden Stroms noch mehr zu erhöhen, so wird man nach Müllers Versuchen einen violetten Farbeneindruck erhalten. Die Erklärung hierzu ist nach dem angenommenen Prinzip, daß die Stromverstärkung zur Folge haben wird, daß der Katelektrotonus sich noch weiter in die innere plexiforme Schicht hineinschiebt. Wir nehmen deshalb an, daß die nächstäußerste der sekundären Schichten der Entwicklungsort für Rot ist.

Man könnte hier fragen: Aber warum sollen wir annehmen, daß die nächstäußerste der sekundären Schichten der Entwicklungsort für Rot ist, wenn wir faktisch bei diesem elektrischen Versuche nicht eine rote, sondern eine violette Farbe sehen? Es kommt mir indessen als wahrscheinlich vor, daß die nächstäußerste Schicht dennoch der Entwicklungsort für Rot ist, denn zwar sehen wir bei diesem elektrischen Versuche violett, aber das kann darauf beruhen, daß wir bei der angewandten Stromstärke sowohl in der äußersten als in der nächstäußersten Schicht eine Wirkung erhalten. Man muß bedenken, daß es ja zudem einigermaßen sicher ist, daß der Katelektrotonus in diesem Falle wohl ebenso stark ist in der äußersten („blauen") wie in der nächstäußersten („roten") Schicht. Selbst wenn die nächstäußerste der sekundären Schichten, wenn sie allein wirksam

wäre, der Entwicklungsort für eine rote Farbe wäre, so würde dieser elektrische Versuch doch nur eine violette Farbe hervorrufen können, da die äußerste sekundäre Schicht mitwirken muß.

Mehr Farben kann man mittels des aufsteigenden Stroms nicht hervorrufen; das Auge erträgt keine größere Stromstärke[1]), und wir können folglich nichts davon wissen, wie eine weitere Erhöhung des aufsteigenden Stroms auf uns einwirken wird. Die Erfahrungen, die wir mit Rücksicht auf den aufsteigenden Strom gemacht haben, führen uns also zu der Annahme, daß die äußerste der sekundären Schichten der Entwicklungsort für Blau ist, sowie daß die nächstäußerste Schicht der Sitz für Rot ist. So weit, was den aufsteigenden Strom betrifft.

Wird das Auge nun von einem schwachen absteigenden Strom beeinflußt, so wird in der Nervenfäden- und Ganglienzellenschicht Katelektrotonus entstehen. Ist der Strom schwach, so sehen wir, wie früher gesagt, nur eine Verdunkelung des Gesichtsfeldes, da die Stab-Zapfenschicht im Anelektrotonus ist; wird aber die Stromstärke etwas erhöht, so sieht man nach G. E. Müller gelb. Der Katelektrotonus wird also jetzt weiter nach außen gelangen können, also auswärts dringen in die innerste Partie der inneren plexiformen Schicht. Wir nehmen deshalb an, daß die innerste der sekundären Schichten der Entwicklungsort für Gelb ist. Wird der absteigende Strom noch mehr verstärkt, so wird man nach Müllers Angabe gelbgrün sehen. Wir nehmen daher an, daß der Katelektrotonus in diesem Falle sich noch weiter nach außen schiebt in der inneren plexiformen Schicht, und daß die nächstinnerste der sekundären Schichten der Entwicklungsort für Grün wird[2]). Zufolge unserer Hypothese soll so die innerste der sekundären Schichten der Entwicklungsort für Gelb sein, das nächstinnerste für Grün. Bei der Diskussion der Wirkung des aufsteigenden Stroms fanden wir außerdem, daß die äußerste sekundäre Schicht als Entwicklungsort für Blau angenommen werden muß, während die nächstäußerste der Entwicklungsort für Rot wird. Wir haben also vier Farben: Blau, Rot — Grün, Gelb in den sekundären Partien der inneren plexiformen Schicht hypothetisch placiert. Diese vier Farben sind ja die Farben, welche die Psychologen Hauptfarben nennen, ein Umstand, dem man doch auf Grund des hypothetischen Charakters der ganzen Betrachtung noch keine entscheidende Be-

---

[1]) G. E. Müller hat keine Stromstärke angewendet, die 22 Milliampère überstiegen hätte.

[2]) Den Grund betreffend, warum wir die nächstinnerste sekundäre Schicht als Entwicklungsort für Grün annehmen und nicht für Gelbgrün — wie der elektrische Versuch andeuten könnte — siehe Anm. S. 65, wo ein ganz analoges Verhältnis mit Rücksicht auf die Farben Violett und Rot erklärt ist.

deutung beilegen kann. Unter „Hauptfarben" verstehen wir im Anschluß an Ebbinghaus: die Spektralfarben, welche uns nicht an ihre zwei Nachbarfarben im Spektrum (dieses denkt man sich suppliert mit Purpur) erinnern.

Die physiologische Hypothese, die hier ausgesprochen ist, scheint sich so sehr auf die vorliegenden Fakta zu stützen, daß man wohl dabei stehen bleiben und abwarten kann, inwieweit eine künftige Erweiterung unserer Erfahrung sie noch wahrscheinlicher machen oder widerlegen wird. Wir wollen uns indessen noch weiter ins Hypothetische hinauswagen, etwas, das wohl als berechtigt angesehen werden kann, wenn man sich nur über den subjektiven Charakter einer solchen Betrachtung klar ist; wir wollen also die hier ausgesprochene Hypothese näher entwickeln und supplieren, um daraus einige Eigentümlichkeiten unserer Farbenempfindungen zu erklären.

Nach den obigen Betrachtungen wird die innere plexiforme Schicht der Entwicklungsort für die vier Hauptfarben sein, so daß diese Farben auf die in Fig. VIIa angedeutete Weise placiert sind. Dagegen

a.
Blau
Rot
x
Grün
Gelb

b.	
1.	Blau
2.	Rot
3.	Gelb
4.	Blau
5.	Grün
6.	Gelb

Fig. VII.

wurde noch nichts davon gesagt, welche Funktion wir der Strecke x (siehe Fig. VIIa) zuschreiben sollen. Es könnte vielleicht sogar annehmbar scheinen, daß die Schicht x gar nicht existierte, oder mit andern Worten, es könnte vielleicht annehmbar scheinen, daß die nächstäußerste und die nächstinnerste von den sekundären Schichten unmittelbar aneinander grenzen[1]). Wenn man indessen jetzt von einem andern Gesichtspunkte ausgehen will, nämlich von den Grundfakten, die wir aus der Farbenpsychologie kennen, und „die Theorie der sekundären Schichten" mit diesen Grundfakten

[1]) Sowohl bei Versuchen mit dem aufsteigenden, als auch bei Versuchen mit dem absteigenden Strom müssen wir ja bei einer gewissen Stromstärke einhalten, die das Maximum mit Rücksicht auf das, was das Auge verträgt, angibt. Wir wissen daher nichts davon, wie eine weitere Stromverstärkung — in beiden Richtungen — auf uns einwirken würde.

in Übereinstimmung bringen, so wird dies nur möglich, wenn wir uns denken, daß die Strecke *x* in der innern plexiformen Schicht auch der Entwicklungsort für die zwei Farben, Blau und Gelb, ist, so daß die innere plexiforme Schicht in sechs sekundäre Schichten geteilt gedacht werden muß in der Ordnung, wie Fig. VIIb zeigt. Nur ausgehend von einer solchen Annahme, können wir die Grundeigentümlichkeit bei unseren Farbenempfindungen erklären, daß naheliegende Spektralfarben durch Mischung die dazwischenliegenden Farbentöne geben, sowie daß eine Mischung von Blau und Rot uns auch die dazwischenliegenden Farben gibt. Daß Blau und Rot durch Mischung in verschiedenen Quantitäten die dazwischenliegenden violetten und purpurfarbigen Übergangstöne hervorrufen, kann nach dem einmal angelegten Gesichtspunkt annehmbar scheinen, da Blau und Rot nach der Theorie der sekundären Schichten Entwicklungsorte haben, die aneinander grenzen (1. und 2. Schicht). Auf ganz ähnliche Weise könnte es erklärlich sein, daß Gelb und Grün durch Mischung Gelbgrün geben, da auch die Entwicklungsorte dieser Farben — Gelb und Grün — aneinander grenzen (5. und 6. Schicht). Sollen wir dagegen erklären, warum Rot und Gelb gemischt Orangengelb geben, und warum Blau und Grün gemischt Blaugrün geben, so wird dies nur möglich, wenn wir uns die Strecke *x* (Fig. VIIa) in zwei Schichten geteilt denken, deren äußerste (die 3.) der Entwicklungsort für Gelb ist, während die folgende (die 4.) die für Blau ist.

Es sieht zweifelsohne etwas sonderbar aus, daß zwei Farben, Gelb und Blau, auf diese Weise jede an zwei Orten in der inneren plexiformen Schicht repräsentiert werden, und das scheint mir auch ein wesentlicher Stein des Anstoßes zu sein. Man muß indessen bedenken, daß diese zwei Farben, Gelb und Blau, in unserer Farbenauffassung auf verschiedene Weise dominieren. Will man z. B. durch Mischung von zwei Spektralfarben Weiß (Grau) hervorbringen, so ist es eine für jeden, der sich damit beschäftigt hat, wohlbekannte Sache, daß sich dies ziemlich leicht tun läßt, wenn es sich um Blau und Gelb handelt, daß es aber bedeutend schwieriger ist, Weiß durch eine Mischung von Rot und Blaugrün oder anderen Farbenpaaren zu erhalten. Da Helmholtz das erste Mal versuchte, ob zwei Spektralfarben durch Mischung Weiß geben könnten, gelang ihm dies auch mit den Farben Gelb und Blau, aber erst mehrere Jahre später fand er die andern Komplementärfarben, nachdem Graßmann darauf aufmerksam gemacht hatte, daß es wahrscheinlich mehrere Farbenpaare gebe, die durch Mischung Weiß ergäben.

Die zwei genannten Farben, Gelb und Blau, sind indessen nicht allein bei Komplementärmischung von besonderer Bedeutung. Es

ist schon längst ausgemacht, daß wir im mittleren Teile der Retina alle Spektralfarben sehen, daß wir aber mit den mehr peripherischen Teilen der Retina bis hinein zur äußersten Randzone (exkl.) außer den neutralen Farben nur Gelb und Blau sehen[1]). Dazu kommt, daß Gelb und Blau auch bei gewissen Arten von Farbenblindheit eine besondere Rolle spielen. Die Totalfarbenblinden sehen ja alles grau in grau (wir haben oben versucht, zu erklären, warum), während alle oder fast alle Dichromaten im Spektrum nur Blau und Gelb sehen. Es scheint also, als ob die gelben und blauen Farben mehr Lebenskraft hätten als die andern Spektralfarben, was wieder in hohem Grade darauf hindeutet, daß diese zwei Farben anatomisch oder physiologisch begünstigt sein müssen. Verschiedene Erfahrungen machen es übrigens wahrscheinlich, daß die eigentümliche Farbenauffassung der Dichromaten eher einer Funktionsunfähigkeit als einem anatomischen Defekte zu verdanken ist. Die Dichromatie kann nämlich unter verschiedenen pathologischen Zuständen auf eine kurze Zeit gehoben werden. Dr. Lehmann hat mir z. B. mitgeteilt, daß ein Dichromat, der durchaus nicht glauben wollte, daß sein Farbensinn vom normalen abweiche, seines Defektes vollständig überführt wurde, als er einmal bei einem Vergiftungsfalle, der durch den Genuß von Muscheln hervorgerufen war, einige Minuten lang Farben sah, die er früher nie gesehen hatte. Man wird vielleicht, wenn man an diesen Fall denkt, etwas weniger skeptisch sein gegenüber der Behauptung, daß Farbenblindheit im hypnotischen Schlafe soll gehoben werden können. Dies hat man bisher für unwahrscheinlich angesehen, indem man, wie z. B. Wundt, meinte, daß nur von einer Suggestion der Farbennamen die Rede sei und nicht von einer wirklichen Erweiterung des Farbensystems.

Es wurde oben gesagt, daß alle oder fast alle Dichromaten im Spektrum nur Gelb und Blau sehen. Es ist am klügsten, zu sagen f a s t a l l e, da man nicht mit Sicherheit in Abrede stellen

---

[1]) Es ist in diesem Zusammenhang auch bemerkenswert, welche negativen Nachbilder man auf dem peripherischen Teile der Netzhaut (die Randzone ausgenommen) sieht. Man hat früher (das gilt z. B. von Helmholtz) gemeint, daß die negativen Nachbilder im Zentrum und in der Peripherie der Retina gleich aussehen, aber im Jahre 1871 wiesen Adamük und Woinow in einer, wie es scheint, ziemlich vergessenen Abhandlung (Gräfes Arch. Bd. 17, Abt. I, p. 151) nach, daß die Farbe des peripherischen Nachbildes sich nach dem Farbeneindruck richtet, den die Einwirkung auf die peripherische Netzhaut macht. So werden „violette" Strahlen, d. h. Strahlen von der ungefähren Wellenlänge $\lambda = 430$, im Zentrum ein grüngelbes Nachbild hervorrufen, während das peripherische Nachbild orangegelb wird, da die „violetten" Strahlen uns hier blau erscheinen. Das negative Nachbild ist also komplementär zu dem Farbentone, den die Einwirkung an der peripherischen Stelle hervorruft, selbst wenn dieser Farbenton ein anderer ist als der, den man bei derselben Einwirkung zentral sieht.

kann, daß es auch Menschen gibt, die im Spektrum nur Rot und Grün sehen, die also das sind, was man mit einem allgemein gebrauchten, aber höchst unglücklichen Ausdruck „violettblind" nennt. Es ist jedoch nicht zu viel gesagt, wenn man behauptet, daß man auch noch nicht einen einzigen verläßlichen Fall dieser Art von Farbenblindheit konstatiert hat. Mehrere der tüchtigsten Farbentheoretiker, z. B. König, meinen deshalb auch, es sei einstweilen am besten, von dieser Klasse von Dichromaten abzusehen. Gibt es deren, so muß ihre Anzahl jedenfalls ganz verschwindend sein im Vergleich mit den Dichromaten, die nur Blau und Gelb sehen.

Man kann freilich nicht behaupten, daß die hier genannten Beispiele der besonderen Stellung, die Gelb und Blau einnehmen, gerade die Ordnung notwendig machen, die in Fig. VIIb skizziert ist, aber eine Stütze bietet sie doch. Wenn man indessen auf die Annahme eingehen will, daß die Entwicklungsorte für die vier Hauptfarben sind, wie in Fig. VIIb angegeben, so kann man daraus ein anderes Farbenmischungsproblem erklären. Man kann nämlich durch Mischung von Spektralfarben, die auf der einen Seite von Grün liegen (Rot-Grün), die dazwischenliegenden Farbentöne hervorbringen, jedoch wohl mit einem ganz unbedeutenden Sättigungsverlust, und dasselbe ist der Fall, wenn man Farben mischt, die auf der anderen Seite von Grün liegen (Violett-Grün). Wenn man dagegen nicht allzu distante Farben, die auf beiden Seiten von Grün liegen, mischt, also gelbgrüne oder blaugrüne Farben, so erhält man zwar als Resultat grünliche Farbentöne, jedoch mit einem bedeutenden Sättigungsverluste, d. h. die grünliche Mischungsfarbe sieht bedeutend weißlicher aus als die entsprechenden grünen im Spektrum. Dieses Phänomen, das eine so große — wahrscheinlich eine allzu große — Anziehungskraft für die Farbentheoretiker gehabt hat,[1]) kann mit der besprochenen Placierung der Spektralfarben in den sechs sekundären Schichten ganz gut in Übereinstimmung gebracht werden. Mischt man nämlich Gelbgrün und Blaugrün, so können wir annehmen, daß alle Schichten, die Entwicklungsorte für Grün, Gelb und Blau sind, in Wirksamkeit kommen. Kommen aber alle sekundäre Schichten mit Ausnahme der Rot-Schichte in Wirksamkeit, so wird das zur Folge haben, daß die erste und dritte Schicht einander neutralisieren, d. h. Grau geben. Die erste und dritte Schicht wirken so, als ob der Mischung ein Überschuß an Grau zugesetzt würde. Von den anderen drei fungierenden Schichten geben die vierte und fünfte Blaugrün, die

[1]) Dieses Phänomen ist es, das durch die umgebogene Ecke in dem bekannten Farbendreieck seinen Ausdruck findet, das das Symbol für das Farbenmischungsgesetz ist.

fünfte und sechste Gelbgrün. Das Resultat des Zusammenwirkens der fünf Schichten wird also das sein, daß man eine weißlichgrüne Farbe sieht.

Noch eine Eigentümlichkeit am trichromatischen Farbensystem wollen wir hier besprechen. Jede Spektralfarbe wird ja als neutralfärbig aufgefaßt, sowohl wenn sie sehr lichtschwach ist, als auch, wenn sie sehr lichtstark ist. Der erste Fall: daß alle Spektralfarben bei stark herabgesetzter Beleuchtung dunkel-graulich aussehen, haben wir früher besprochen und es daraus erklärt, daß der Zapfenapparat, wenn die Beleuchtung abnimmt, nicht so lange wirkt, wie der Stäbchenapparat. Will man indessen der Frage auf den Grund kommen, warum uns eine jede beliebige Spektralfarbe weißlich erscheint, wenn die Beleuchtung verstärkt wird, so kann man dies so erklären: Man kann annehmen, daß die Wirkung in einer der sekundären Schichten der inneren plexiformen Schicht, eben weil die Einwirkung in diesem Falle sehr stark ist, sich zu den anderen sekundären Schichten verpflanzen wird; und ist das richtig, werden alle sekundären Schichten in Wirksamkeit versetzt, wenn irgend eine beliebige Spektralfarbe einwirkt, so wird das Resultat sein, daß wir eine weißliche Farbe sehen. Die erste und sechste Schicht wird grau geben, die zweite und fünfte ebenfalls Grau, und dasselbe wird bei den zwei mittleren Schichten, der dritten und vierten, der Fall sein. Das Resultat des Zusammenwirkens der sechs sekundären Schichten wird offenbar sein, daß wir eine weißliche Farbe sehen. Die störenden Blendungsgefühle, die gleichzeitig auftreten, müssen als ein sekundäres, übrigens noch nicht aufgeklärtes Phänomen[1]) betrachtet werden, das mit dem Faktum, das wir hier weiß sehen, nicht direkt zusammenhängt; die Blendungsempfindungen treten nämlich schon bei einer Beleuchtung auf, wo die Spektralfarben, obwohl sie sehr hell sind, doch ihre spektrale Qualität noch keineswegs verloren haben.

Wir haben im vorausgehenden beständig die unaufgeklärte Tatsache vorausgesetzt, daß gewisse Farbenpaare bei Mischung Grau geben. Betrachtet man Fig. VIIb, so sieht man, daß diese Farbenpaare, die komplementären Farben, symmetrisch um die Mittellinie der inneren plexiformen Schicht geordnet sind. Man könnte sich denken, daß dies eine gewisse Bedeutung hat, eine Möglichkeit, die doch nicht näher untersucht werden kann, solange wir, wie es jetzt der Fall ist, ganz und gar nicht wissen, welche

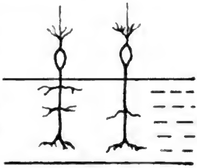
---

[1]) Siehe Centralblatt f. prakt. Augenheilk. 1903, J. Bjerrum, Wie entsteht der Schmerz bei Lichtscheu?

physiologischen Prozesse bei der Auffassung der Komplementärfarben vor sich gehen. „Die Theorie der sekundären Schichten“ kann darüber keinen Aufschluß geben, warum gewisse Farbenpaare durch Mischung Weiß geben, nicht einmal eine Andeutung einer Erklärung scheint hier möglich zu sein. Da indessen auch keine andere Farbentheorie, soweit mir bekannt, das Problem des Komplementarismus auf verläßliche Weise erklärt hat, kann man vielleicht mit Grund annehmen, daß die Lücke, die wir hier in unserem Wissen (und in unseren Hypothesen) haben, nicht von einer mangelhaften Gedankenkombination kommt, sondern vielleicht eher von dem Umstande, daß wir der Erfahrungen entbehren, die als Glieder in einer Erklärung gehören. Die Vermutung ist sehr naheliegend, daß eine Erweiterung unserer Kenntnis des Wesens der Elektrizität auch auf diesem Gebiete aufklärend wirken wird. — Wenn oben gesagt wurde, daß noch keine Farbentheorie in verläßlicher Weise das Komplementärproblem gelöst hat, so liegt dieser Behauptung natürlich eine Schätzung der verschiedenen Farbentheorien zugrunde. Ohne auch nur auf die bekanntesten unter ihnen näher einzugehen, will ich zur Erklärung sagen, daß ich eine Farbentheorie nur dann als verläßlich ansehen kann, wenn sie sich wenigstens in einzelnen, wesentlichen Punkten auf das stützt, was man jetzt faktisch von der Anatomie und Physiologie der Retina weiß. Früher konnte man Grund dazu haben, von der Kenntnis unserer Farbenempfindungen auszugehen und daraus allein eine physiologische Farbentheorie zu konstruieren, aber jetzt, nachdem die letzten 15—20 Jahre uns so wesentliche Aufklärungen betreffs der nervösen Elemente in der Retina gebracht haben, wird es doch am natürlichsten sein, von der wirklich sicheren und zuverlässigen Kenntnis auszugehen, die wir im großen und ganzen von der Retina haben, und soweit als möglich hieraus die verschiedenen Empfindungserfahrungen zu erklären zu suchen. Wir sagen „soweit als möglich“, denn wer nur die Methode anwenden will, von der Physiologie zur Psychologie weiterzuschreiten, wird diesen Weg oft gesperrt finden. Es wird deshalb immer Grund dazu vorhanden sein, mit Hilfe des Materials, das hier die Psychologie uns zurechtelegt, zu supplieren, d. h. von gewissen psychologischen Fundamentalsätzen auszugehen und zu untersuchen, was physiologisch dem entsprechend sein kann. Ich habe dies selbst getan in dem Raisonnement, das zur Annahme der zwei mittleren von den sechs sekundären Schichten (der dritten und vierten) führte, ohne übrigens bestreiten zu wollen, daß diese Methode wesentlich als eine Nothilfe betrachtet werden muß, da man auf diese Weise dazu kommen kann, ein und demselben

psychologischen Faktum eine sehr verschiedene physiologische Auslegung zu geben. Jeder, der die Farbenliteratur des letzten halben Jahrhunderts nur flüchtig durchgeblättert hat, wird wissen, wie wirklich sichere und verläßliche farbenpsychologische Erfahrungen die Grundlage für äußerst verschiedene physiologische Theorien bilden. Nur eine einzige Theorie, die oft genannte Kries-Parinaudsche, hat auf eine besonders scharfsinnige und bewundernswerte Weise es verstanden, was man nach Fechner die Physiologie „von oben" nennen könnte, mit der Physiologie „von unten" zu kombinieren, und die Absicht mit der „Theorie der sekundären Schichten" ist daher auch die gewesen, die Kries-Parinaudsche Theorie sowohl mit Rücksicht auf die Methode als auf die Resultate zu supplieren.

Da es für mich von großem Interesse war, zu erfahren, ob die hier verteidigte Farbentheorie sich mit den neuesten anatomischen Erfahrungen vereinigen lasse, wandte ich mich an den bekannten spanischen Anatom Prof. Ramon y Cajal in Madrid, indem ich ihm das wesentlichste an meiner Hypothese entwickelte, und bat ihn, mir seine Meinung darüber mitzuteilen. Prof. Cajal zeigte großes Interesse für die Hypothese, die



der inneren plexiformen Schicht bei Auffassung von Spektralfarben wesentliche Bedeutung beimißt, machte aber doch zwei Einwendungen dagegen. Diese Einwendungen Cajals will ich nun wiedergeben, um später dazu meinen Standpunkt einzunehmen. Prof. Cajal schreibt am 2. Juli 1904 folgendes:

„Je ne trouve que deux faits peut-être un peu embarassants pour votre explication et que vous interpréterez satisfactoirement savoir:

a) que chez les oiseaux et les reptiles les bipolaires de cônes ont des collatérales avec des variations dans le numéro et la situation de celles-ci (Peut-être dans ces variations trouverez vous quelque chose se prêtant à une interprétation favorable);

b) que étant donnée la distance rélativement considérable où se trouvent dans la rétine les cônes allant inférieurement à un étage spécial de la zone plexiforme interne l'acuité visuelle ou sensibilité différencielle de cette membrane se trouverait assez diminuée peut-être plus que les expériences physiologiques (sur les distances les plus petites auxquelles deux points lumineux très proches sont chromatiquement distingués) nous font supposer."

Hinsichtlich der ersten Einwendung Ramon y Cajals (a) will ich folgendes bemerken: Es kann kaum irgend ein Zweifel sein, daß die genannte Verzweigung sich mit der Hypothese schwer vereinigen läßt. Es ist indessen möglich, daß die in der Figur gezeigte Verzweigung in der sekundären Schichtenteilung des inneren plexiformen Stratums gleichwohl nicht so große Bedeutung hat, da sie sich nach Prof. Cajals Angabe nur bei den Vögeln (Tagvögeln?) und Kriechtieren findet, also nur bei Tieren, deren Retina von der des Menschen sehr verschieden ist. Wir haben bei Aufstellung und Begründung der Hypothese unseren Ausgangspunkt entschieden von den Farbenempfindungen des Menschen genommen (u. a. weil man nur hier „galvanische Gesichtsempfindungen“ bestimmen kann), und es ist doch überhaupt zweifelhaft, ob man von bestimmten Farbenempfindungen beim Menschen auf analoge Empfindungen bei Tieren schließen kann, wenn die Retina von anderer Beschaffenheit ist, als die des Menschen.

Zur zweiten Einwendung Ramon y Cajals (b) habe ich meinen Standpunkt gewählt, indem ich die einschlägige Fachliteratur untersuchte und dadurch zu der Überzeugung kam, daß die Hypothese in diesem Punkte kaum Schwierigkeiten begegnen wird. Die wichtigsten der bisher vorgenommenen Untersuchungen über die Sehschärfe (l'acuité visuelle) können nämlich folgendermaßen resumiert werden: Aubert hat die Sehschärfe untersucht, indem er physiologische Punkte bestimmte, d. h. die kleinsten Netzhautbilder, die als ein einzelner Sinneneindruck erfaßt werden können[1]). Für die Fovea findet Aubert (der jedoch nur mit Neutralfarben gearbeitet hat), daß der Durchmesser des physiologischen Punktes = 0,0025 mm ist. Parallelisiert man dieses Resultat Auberts mit Greeffs Angabe der Größe des Zapfendurchmessers im frischen Menschenauge[2]), so sieht man, daß Greeff genau zu demselben Werte kommt wie Aubert, indem er findet, daß die Zapfen in der Fovea nur einen Durchmesser = 0,0025 mm haben. Eine bessere Übereinstimmung könnte man nicht erwarten oder wünschen.

Da Auberts Versuche, die ja der Zeit nach etwas zurückliegen, einer Bestätigung durch kontrollierende Versuche bedürfen könnten, die nach modernen Gesichtspunkten angestellt wären, hat der deutsche Ophthalmologe Guillery Auberts Untersuchungen wieder aufgenommen, die er zudem auf verschiedene Weise suppliert hat, indem er u. a. auch mit Spektralfarben arbeitete[3]). Wir wollen

---

[1]) Physiologie der Netzhaut, p. 203.

[2]) Graefe-Saemisch' Handbuch usw., p. 113 f.

[3]) Zeitschr. usw. 1896, Bd. 12, p. 261, und 1897, Bd. 13, p. 208, samt Pflügers Archiv, 1897, Bd. 68.

nun zuerst Guillerys Versuche mit den neutralen Farben besprechen. Die diesbezüglichen Versuche führten Guillery zu Resultaten, die den von Aubert gefundenen sehr ähnlich sind, jedoch erhielt Guillery für den physiologischen Punkt in der Fovea etwas größere Zahlen als Aubert. Nachdem Guillery den physiologischen Punkt für die Fovea gefunden hat, bestimmt er — immer mit neutralen Farben, wie die Größe des physiologischen Punktes variiert, wenn man von der Fovea gegen die Ora serrata rückt. Guillery erreicht dadurch das Resultat, daß bei gewöhnlichem Tageslicht der physiologische Punkt immerfort größer und größer wird, wenn man sich von der Fovea entfernt. Ferner untersucht Guillery (und Cajal hat wohl nächst an solcherlei Versuche gedacht), ein wie großes Intervall zwischen zwei minimalen Netzhautbildern sein muß, damit diese zwei Bilder nur soeben als getrennt aufgefaßt werden können[1]). Guillery findet, daß dieses Intervall von Fovea bis 10° von da eben so groß war wie der Diameter für den physiologischen Punkt der Stelle ist, was m. a. W. sagen will, daß, wie schon Helmholtz (lib. cit. p. 258) gesagt hat, ein unbeeinflußtes Zäpfchen zwischen den zwei Zäpfchen liegen wird, auf die die Netzhautbilder fallen. Rückt man weiter als 10° von der Fovea hinaus, so wird das Intervall immer in stärkerem Verhältnisse als der entsprechende physiologische Punkt wachsen, dergestalt daß dieses Intervall in einer Entfernung von 50° von der Fovea fast 10mal so groß wird als der Diameter des physiologischen Punktes eben daselbst. — Guillery hat indessen auch die physiologischen Punkte für die vier Hauptfarben rot, gelb, grün und blau bestimmt. In der Fovea findet er folgende Werte für die Diameter:

für	rot	ist	der Diameter	= 0,007 mm
,,	gelb	,,	,,	= 0,007 mm
,,	grün	,,	,,	= 0,011 mm
,,	blau	,,	,,	= 0,019 mm.

Da das gelbe Pigment der Macula lutea etwas von den grünen und vieles (ca. 40 %) von den blauen Farben absorbiert, würde der Diameter für die physiologischen Punkte dieser Farben wahrscheinlich kleiner werden, wenn kein Pigment in der Macula wäre. — Außerhalb der Fovea findet Guillery, wenn man die Mittelzahl seiner Versuche nimmt, die in der Tabelle *A* angeführten Werte für die Diameter der physiologischen Punkte der vier Farben:

---

[1]) Unter „minimalen Netzhautbildern" versteht man Bilder, die an Größe den physiologischen Punkten der untersuchten Netzhautpartien gleich sind.

Tabelle A.

	blau	gelb	rot	grün
10°	0,039	0,027	0,070	0,080
20°	0,072	0,072	0,170	0,170
30°	0,143	0,139	0,340	0,307
40°	0,270	0,273	0,643	0,597
50°	0,254	0,250	0,600	0,640

Hieraus sieht man übrigens, daß die Komplementärfarben gelb-blau und rot-grün in einer gewissen Entfernung von der Fovea fast gleich große physiologische Punkte haben. Diese Gleichheit ist, wie die Tabelle zeigt, in einer Entfernung von 20° von der Fovea am meisten auffallend. — Alle diese Untersuchungen von Guillery zeigen uns, daß die Sehschärfe keineswegs so fein ist, daß die Hypothese unmöglich gemacht wird, welche der inneren plexiformen Schicht eine entscheidende Bedeutung für unsere Farbenauffassung beilegt. —

Geht man von einer unsicheren, nicht aber unwahrscheinlichen Voraussetzung aus, daß der physiologische Punkt für blau nur ein blau wirkendes Zäpfchen enthält, daß der physiologische Punkt für rot nur ein rotwirkendes Zäpfchen enthält und so weiter für die anderen Farben, so erreicht man das Resultat, daß ein Quadratmillimeter der Netzhaut in einer Entfernung von 20° von der Fovea enthalten wird:

$\frac{1}{\pi\left(\frac{0,072}{2}\right)^2} = 245$ blauwirkende Zäpfchen und ebensoviele gelbwirkende, samt:

$\frac{1}{\pi\left(\frac{0,170}{2}\right)^2} = 44$ rotwirkende Zäpfchen und ebensoviele grünwirkende. Ist diese Betrachtung richtig, so wird also ein Quadratmillimeter der Netzhaut in einer Entfernung von 20° von der Fovea im ganzen ca. 600 Zäpfchen enthalten. Durch eine analoge Behandlung der in der Tabelle A angeführten Zahlen für eine Entfernung von 10° von der Fovea findet man, daß ein Quadratmillimeter hier im ganzen ca. 3000 Zäpfchen enthält.

Die komplementären Farben.

§ 1.

Historische Einleitung[1]).

In Philosophical Transactions für 1672—73 findet sich eine Korrespondenz zwischen Newton und Huyghens, die ein gewisses historisches Interesse besitzt. Man sieht daraus, daß Huyghens, kurz nachdem die Optik von Newton herausgekommen war, die Frage aufwarf, ob es nicht möglich sein sollte, Weiß durch Mischung

[1]) Siehe Donders, Graefes Archiv. 1881, Bd. 27, Abt. I.

von zwei homogenen Farben, Gelb und Blau, hervorzubringen. Newton war indessen sehr abgeneigt, auf diese Betrachtung einzugehen, indem er sich doch zunächst den theoretischen Konsequenzen gegenüber abweisend stellte, die Huyghens von seiner Behauptung herleiten wollte. Da man damals die Sache durch kein Experiment entscheiden konnte, wird die Diskussion zwischen den zwei berühmten Physikern auf die Weise abgeschlossen, daß Newton die Behauptung von Huyghens für unwahrscheinlich erklärt, übrigens aber auf künftige Untersuchungen hinweist. Newton hat nicht gesehen, daß sein bekanntes Symbol für die Farbenmischungsgesetze eigentlich zeigt, daß jede homogene Farbe — grün ausgenommen — ihre homogene Komplementärfarbe hat. Historisch betrachtet steht diese Diskussion über Komplementärfarben ganz isoliert da; es dauerte lange, ehe man wieder zu untersuchen anfing, ob durch Mischung zweier homogener Farben weißes Licht hervorgebracht werden könne. Indessen war man auf eine etwas abweichende Auffassung der komplementären Farben gekommen. So wie Huyghens das Komplementärproblem stellte, wurde man zur Annahme — nennen wir es — homogener Komplementärfarben geführt; man wandte sich indessen jetzt gegen eine mehr subjektive Untersuchung der Farben, indem zuerst Buffon (1743) und später Scherffer (1765) die Nachbilder studierte, die durch Betrachtung verschiedener Spektralfarben entstehen. Buffon beschränkt sich darauf, anzugeben, welche Nachbilder er gesehen hat; bei Scherffer finden wir aber den ersten Versuch, diese subjektive Farben zu erklären. Seine Erklärung lautet für eine einzelne Farbe so[1]: „da das Auge in längerer Betrachtung der grünen Figur ermüdet, und nachmals auf die weiße Fläche geworfen wird, ist es nicht imstande einen schwächeren Eindruck grüner Strahlen lebhaft zu empfinden: nun prallen zwar alle Gattungen des Lichts von der weißen Fläche zurück, doch sind die grünen im Vergleich mit denjenigen viel weniger, die von dem grünen Flecken in das Auge kamen; wird demnach dieses auf das weiße Papier gewendet, so kann jener Teil nicht mit gehörigem Nachdrucke von dem grünen Lichte gerühret werden, der zuvor dasselbe stärker, denn die übrigen empfand und daher entsteht in demselben die Fühlung einer aus den andern Strahlen gemischten Farbe, welche . . . einem schwachen Purpur gleichen müsse[2]).

Wie man sieht, fällt die Erklärung von Scherffer mit der noch geltenden zusammen, und deshalb wird es billig sein, sich zu erinnern, daß er als der erste die richtige Erklärung gefunden hat,

[1]) Abhandlung von den zufälligen Farben. 1765, p. 21.

[2]) Daß die restierenden Strahlen Purpur geben, zeigt Scherffer durch die Schwerpunktskonstruktion von Newton.

ein Faktum, worauf man nicht immer aufmerksam gewesen ist. Indessen könnte man fragen, weshalb man hier insgemein denselben Namen anwendet, um das „komplementäre“ Nachbild und das homogene Komplementärphänomen zu bezeichnen. Man könnte zwar hierauf antworten, daß wir dies tun, weil die Farbe, die man fixiert, und das Nachbild, das man dadurch bekommt, fast identisch mit zwei homogenen Farben zu sein scheinen, welche gemischt Weiß geben; es kann aber doch auf rationellere Weise gezeigt werden, daß man mit gutem Grunde das Wort „Komplementärfarbe“ in beiden Fällen gebrauchen kann. Um dieses zu zeigen, müssen wir indes das Folgende antezipieren, insofern wir es als bewiesen betrachten müssen, daß jede homogene Farbe ihre eigene homogene Komplementärfarbe hat (dies gilt doch nicht Grün); man kann dann, wenn a und b homogene Komplementärfarben bezeichnen, und das weiße Licht, das hervorkommt, wenn a und b gemischt werden, mit h bezeichnet wird, für das Sonnenlicht S folgende Gleichung aufstellen (vorausgesetzt, daß das Sonnenlicht rein weiß ist):

$$S = (a_1 + b_1) + (a_2 + b_2) + (a_3 + b_3) + \ldots . (a_n + b_n),$$

in welcher Gleichung

$$\begin{array}{c} a_1 + b_1 = h_1 \\ a_2 + b_2 = h_2 \\ a_3 + b_3 = h_3 \\ — — — — \\ — — — — \\ a_n + b_n = h_n \end{array}$$

Wir untersuchen jetzt vermittelst dieser Gleichung, was das sagen will, daß das Auge, nachdem es für eine Farbe ermüdet ist, ein bestimmtes Nachbild sieht. Nehmen wir an, daß das Auge durch längere Betrachtung für eine Farbe a_1 ermüdet wird; nach der Schefflerschen Erklärung wird man dann alle S's-Farben minus a_1 sehen. Von diesem Reste wird $(a_2 + b_2)$ Weiß (h_2) geben; $(a_3 + b_3)$ wird auch Weiß (h_3) geben usw. Übrig bleibt die Spektralfarbe (b_1), und wenn wir dann das Auge für a_1 ermüdet haben, werden wir ein Nachbild erhalten, dessen Farbe $b_1 + h_2 + h_3 + \ldots h_n$ ist. Diese Farbe die Komplementärfarbe zu a_1 zu nennen, wird vollkommen berechtigt sein; um sie aber von der homogenen Komplementärfarbe (b_1) zu a_1 zu unterscheiden, nennen wir die etwas mehr weißliche Farbe $(b_1 + h_2 + h_3 + \ldots . h_n)$ die summative Komplementärfarbe zu a_1. Wenn man wünscht, sich ganz präzis auszudrücken, wird es bisweilen notwendig sein, zwischen diesen zwei verschiedenen Arten von Komplementärfarben zu

unterscheiden, und deshalb ist es praktisch, durch einen sprachlichen Ausdruck die Differenz festzuhalten.[1])

Es wird nicht korrekt sein, die Benennung „subjektive“ Komplementärfarbe gleichdeutig mit „summativer“ Komplementärfarbe zu gebrauchen, wie man gewöhnlich tut, weil die summative Komplementärfarbe nicht nur subjektiv, sondern zugleich auch objektiv bestimmt sein kann. Nehmen wir nämlich an, daß man nicht das Auge für eine Farbe ermüdet und sie nicht auf diese Weise aus dem weißen Lichte eliminiert, sondern daß man dieselbe Farbe objektiv wegeliminiert, indem man sie aus dem Spektrum nimmt, so wird man dann eine summative Komplementärfarbe sehen, insofern man die restierenden Spektralfarben sammelt. Es ist nämlich gleichgültig, wie man eine Farbe — nennen wir sie a_1 — eliminiert, ob es subjektiv geschieht, d. h. dadurch, daß man das Auge für dieselbe ermüdet, oder objektiv, d. h. dadurch, daß man die Farbe aus dem Spektrum nimmt. In beiden Fällen sieht man eine summative Komplementärfarbe, die $= b_1 + h_2 + h_3 + \ldots . h_n$ ist.

Die Komplementärfarben können also geteilt werden in homogene Komplementärfarben, die nur objektiv sind, und summative Komplementärfarben, die sowohl objektiv als auch subjektiv sein können.

Die objektive Summationskomplementärfarbe ist von Bezold durch einen sehr einfachen und schönen Versuch demonstriert worden;[2]) Bezold erreicht hierdurch das Resultat, daß die summative Komplementärfarbe etwas weißlicher ist als die entsprechende homogene Komplementärfarbe. Nach der oben gegebenen Erklärung sieht man auch leicht, daß es so sein muß. — Die subjektive Komplementärfarbe sieht man vielleicht am schönsten bei dem Versuche, den man gewöhnlich „Meyers Versuch“ nennt. Dieser ist in einer Abhandlung in Pogg. Ann. von 1855 beschrieben;[3]) in derselben Zeitschrift hat übrigens F. Schaffgotsch schon im Jahre 1841 einen ganz ähnlichen Versuch mitgeteilt.[4])

Bei der früher für das Sonnenlicht erwähnten Formel setzten wir voraus, daß jede homogene Farbe ihre homogene Komplementärfarbe hat. Das gilt jedoch nicht für die grünen Farben. Läßt man das Auge auf einer grünen Farbe ruhen, so bekommt man ein Nachbild, das purpurgefärbt ist; nimmt man Grün aus dem

---

[1]) Um Weitläufigkeit zu vermeiden, werden wir doch im folgenden, insofern wir nicht ausdrücklich das Wort summative Komplementärfarbe gebrauchen, immer unter der Komplementärfarbe einer Farbe ihre homogene Komplementärfarbe verstehen.

[2]) Wied. Ann. 1887, Bd. 32, p. 165 f.

[3]) Pogg. Ann. 1855, Bd. 95.

[4]) Pogg. Ann. 1841, Bd. 54.

Spektrum und vereinigt dann die restierenden Strahlen, sieht man auch Purpur, und da wie bekannt Purpur im Spektrum nicht gefunden wird, müssen wir annehmen, daß die ultraroten und ultravioletten Strahlen durch Mischung die Komplementärfarbe zu Grün geben.[1])

Nachdem wir nun die summative Komplementärfarbe diskutiert haben, kehren wir wieder zu der homogenen Komplementärfarbe und deren Geschichte zurück. Newton hatte auf künftige Untersuchungen verwiesen, und Helmholtz selbst meinte, er sei der erste, der seit Newton die Frage über die homogenen Komplementärfarben zu erneuter Behandlung aufnehme. In seiner berühmten Abhandlung von 1852[2]) gibt Helmholtz einen neuen und sehr wesentlichen Beitrag zur Farbenlehre, indem er hier mehrere Hauptgesichtspunkte für die spätere Forschung feststellt. Hier erklärt Helmholtz zum ersten Male, weshalb man zwischen Mischung von Farbstoffen und Mischung von Lichtstrahlen unterscheiden darf, und er zeigt eben daselbst, daß man durch Mischung zweier Spektralfarben, Gelb und Blau, Weiß bekommen kann, und gibt hiermit einen Beweis, daß die Behauptung von Huyghens richtig war. — Die früher erwähnte Polemik zwischen Newton und Huyghens wurde im Jahre 1672—73 geführt, und da die Abhandlung von Helmholtz von 1852 ist, scheint also ein Zeitraum von gegen 200 Jahren zwischen der Aufforderung von Newton zu künftigen Untersuchungen und der Antwort von Helmholtz darauf, zu liegen. Das sieht sehr merkwürdig aus, besonders wenn man sich erinnert, daß eine ganze Reihe Physiker Newton nachfolgten, die ein ausgeprägtes Interesse für die Theorie der Farben hatten, und bei näherer Untersuchung der betreffenden Literatur wird man auch nicht ganz unbedeutende Vorarbeiten für die grundlegende Abhandlung von Helmholtz finden, also haben wir deutliche Spuren einer historischen Kontinuität.

Um zu zeigen, daß Gelb und Blau durch Mischung Weiß geben, wendet Helmholtz drei Methoden an, die doch alle benutzt worden sind, ehe die Abhandlung von Helmholtz herauskam. Erstens zeigt Helmholtz, daß man Weiß und nicht Grün bekommt, wenn man mittelst rotierender Scheiben gelbe und blaue Pigmente mischt, indem man also Netzhautbilder zur Deckung

---

[1]) In Philos. Stud., 1893, Bd. 8, schreibt Kirschmann, p. 179: „Wenn man das äußerste Rot des Spektrums mit dem violetten Ende kombiniert, so entsteht bekanntlich Purpur. Der Erfolg tritt aber auch dann noch ein, wenn man das äußerste Rot, das kaum mehr als Farbe erkannt wird, mit dem bei geeigneter Abblendung des übrigen Lichtes sichtbaren Ultraviolett mischt; die Mischung bekommt einen deutlich erkennbaren Stich ins Rosa- oder Purpurfarbene."

[2]) Pogg. Ann. Bd. 87, p. 45—66.

bringt. Diesen Versuch hatte übrigens Plateau im Jahre 1829 gemacht, und er sucht deshalb auch seine Priorität gegen Helmholtz zu behaupten.[1]) — Ferner hat Helmholtz in dieser Abhandlung gezeigt, daß man durch Spiegelung Weiß bekommen kann, wenn man das von gelben und blauen Pigmenten reflektierte Licht mischt. Diese Methode war, was doch Helmholtz übersehen hat, viel früher von Lambert angewendet worden. In Lamberts „Photometria" von 1760 findet man einen ganz ähnlichen Versuch beschrieben (siehe § 1190, pag. 527). — Endlich hat Helmholtz gezeigt, daß man Weiß bekommen kann, wenn man blaue und gelbe Farben im Spektrum vermischt, und er schreibt über diesen Versuch: „Übrigens habe ich ebensowenig wie Forbes, bei Newtons Nachfolgern bis in die neueste Zeit Versuche über die Mischung einzelner prismatischer Farben gefunden." Wenigstens einen Schriftsteller vom achtzehnten Jahrhundert findet man doch, der mit prismatischen Farbenmischungen experimentiert und dadurch nachgewiesen hat, daß nicht nur gelbe und blaue Farbenstrahlen Weiß geben können, sondern daß dieses auch von mehreren anderen Farbenpaaren gilt — was Helmholtz noch in der Abhandlung von 1852 bezweifelt. Dieser Schriftsteller ist C. E. Wünsch; sein Buch, das 1792 erschien und den Titel trug: „Versuche über die Farben des Lichtes", erwähnt ausschließlich prismatische Farbenmischungen. Übrigens ist es aber zweifelhaft, ob Wünsch — bei der mangelhaften Versuchsmethode der damaligen Zeit — eigentlich mehr gesehen habe als eine gute Annäherung zu einer richtigen Komplementärmischung.

Während Wünsch durch seine Experimente das Resultat erreichte, daß es wenigstens drei Paar Komplementärfarben gibt, hatte Helmholtz noch in der Abhandlung von 1852 nur ein Paar gefunden, nämlich Gelb und Blau. Dieser Punkt war es, gegen den die Kritik gleich gerichtet wurde. Im folgenden Jahre, nachdem die Abhandlung von Helmholtz erschienen war, schrieb Graßmann (der sicher ebensowenig wie Helmholtz etwas von Wünsch wußte) eine merkwürdige kleine Abhandlung,[2]) die gegen Helmholtz gerichtet war und deren Zweck war, zu zeigen, das jede homogene Farbe — Grün ausgenommen — ihre homogene Komplementärfarbe hat. Wenn wir die Abhandlung von Graßmann merkwürdig nennen, hat es seinen Grund darin, daß er ein Problem, das scheinbar nur experimental gelöst werden kann, durch ein logisch-mathematisches Raisonnement zu lösen sucht. Statt zu versuchen,

[1]) Pogg. Ann. Bd. 88, p. 172 f. Reklamation wegen einer Stelle im Aufsatz des Herrn Helmholtz usw.

[2]) Pogg. Ann. Bd. 89, p. 69—84.

ob es nicht möglich sein sollte, mehr Komplementärpaare zu finden, will Graßmann ausschließlich auf den Wegen des Gedankens zeigen, daß jede homogene Farbe ihre homogene Komplementärfarbe haben muß. Dieser Beweis ist keineswegs zwingend, weil Graßmann fehlerhafte Voraussetzungen einführt; diese Voraussetzungen stimmten aber so gut damit überein, was man damals als richtig ansah, daß die Abhandlung von Graßmann mit fast einstimmiger Akklamation empfangen wurde. Selbst Helmholtz beugte sich willig vor dem Raisonnement von Graßmann, woran doch wesentlich der Umstand schuld war, daß Graßmann, indem er Newtons Schwerpunktskonstruktion anwendete und übrigens die Observationen von Helmholtz benutzte, für die Wellenlängen der Komplementärfarben Zahlen angab, die sehr gut mit den Zahlen übereinstimmten, die Helmholtz unmittelbar darauf fand. Angespornt durch die Abhandlung von Graßmann fing Helmholtz jetzt zu untersuchen an, ob es nicht möglich wäre, einen experimentalen Beweis dafür zu liefern, daß es mehrere Komplementärpaare gibt, und, indem er eine verbesserte Versuchsmethode anwendete, gelang es ihm wirklich nachzuweisen, daß jede homogene Farbe — Grün doch ausgenommen — ihre homogene Komplementärfarbe hat.[1]) Danach bestimmte Helmholtz die Wellenlänge für sieben Paar Komplementärfarben und konstruierte nach den für diese Wellenlängen gefundenen Zahlen eine Kurve, durch welche die Wellenlänge einer Farbe als eine Funktion der Wellenlänge ihrer Komplementärfarbe ausgedrückt wird. Die Wellenlängen setzt Helmholtz auf „einer horizontalen und vertikalen Abszisseachse“ ab, und er erhält hierdurch eine Kurve, an welche er folgende Bemerkung knüpft: „Die Kurve hat zwei kongruente Arme . . . . . deren jeder mit beiden Enden asymptotisch in eine den Abszisseachsen parallele gerade Linie auszulaufen scheint.“ Was das Verhältnis zwischen den Wellenlängen der Komplementärfarben anbelangt, bemerkt Helmholtz, „daß es nicht konstant ist; es schwankt zwischen dem der Quarte 1,333 und dem der kleinen Terz 1,20“.

Diese Anschauung, daß kein konstantes Verhältnis zwischen den Zahlen besteht, die den Wellenlängen der Komplementärfarben entsprechen, hat Helmholtz festgehalten, und es ist deshalb als eine ausgemachte Sache betrachtet worden, daß man hier mit dem Spekulieren fertig sei. Selbst in der jüngsten Zeit findet man Anschluß an das negative Resultat von Helmholtz bei Ebbinghaus, welcher in seiner großen Psychologie (pag. 211) folgendes schreibt: „Die innerhalb des Spektrums enthaltenen Komplementärfarben

[1]) Pogg. Ann. 1855, Bd. 94, p. 1—28.

liegen etwa um ein Drittel bis zur Hälfte des Gesamtbereiches der sichtbaren Wellenlängen voneinander entfernt, aber eine einfache numerische Beziehung zwischen ihren Wellenlängen besteht nicht." — Soweit mir bekannt, haben nur zwei Schriftsteller, Bezold und Lommel, die negative Behauptung von Helmholtz zu widerlegen versucht. Indem Bezold die Komplementärkurve von Helmholtz betrachtete, gelangte er zu der Hypothese, daß diejenigen Observationen, nach denen diese Kurve gezeichnet, vielleicht durch die Gleichung für eine gleichseitige Hyperbel befriedigt werden können; und durch eine eigentümliche Benutzung der Young-Helmholtzschen Farbentheorie, und indem er übrigens Berechnungen mit den Observationen von Helmholtz vornahm, erreicht er als Resultat, daß die Komplementärkurve von Helmholtz wirklich eine gleichseitige Hyperbel ist.[1]) Doch wird es nicht schwierig sein nachzuweisen, daß Bezold bei diesen Berechnungen wenigstens einen prinzipiellen Fehler begangen hat, worauf wir doch nicht näher eingehen wollen, weil die Hyperbelgleichung von Bezold auch aus einem anderen Grunde unrichtig ist. Bezold beachtet nämlich nicht, daß die Komplementärkurve symmetrisch sein muß, weil jede Farbe die Komplementärfarbe ihrer Komplementärfarbe ist. Eine Komplementärkurve wird, sei sie eine Hyperbel oder nicht, in zwei symmetrische Halbteile geteilt sein, und ferner wird sie als Symmetrieachse eine Linie haben, die durch den Anfangspunkt des Koordinatsystems geht und einen Winkel von 45^0 mit den positiven Richtungen der Koordinatachsen bildet. Das ist nicht der Fall mit der Hyperbel von Bezold, in welcher die Asymptoten wohl mit den Koordinatachsen parallel sind, nicht aber in gleich großem Abstande von diesen sind. Die Hyperbelgleichung von Bezold enthält infolgedessen drei Konstanten und kann schon deshalb unmöglich Gleichung für eine Komplementärkurve sein.

Von einer ganz ähnlichen Kritik, wie von der gegen Bezold gerichteten, wird der andere Schriftsteller getroffen, welcher versucht hat, ein konstantes Verhältnis zwischen den Wellenlängen der Komplementärfarbe zu finden, nämlich E. Lommel.[2]) Auf einem Wege, den wir hier näher zu erwähnen keinen Grund haben, erreicht Lommel das Resultat, daß die Differenz zwischen den Schwingungszahlen konstant ist, Indem er bei λ' und λ'' die Wellenlängen der Komplementärfarben versteht, erreicht Lommel nämlich folgende Gleichung: $\frac{I}{\lambda''} \div \frac{I}{\lambda'} = \frac{b}{2}$, wo b eine Konstante ist.

[1]) Pogg. Ann. 1873, Bd. 150, p. 71—93 und p. 221—247.
[2]) Wied. Ann. 1891, Bd. 43, p. 473 f.

Da λ' und λ'' indessen nicht auf dieselbe Weise in der Gleichung hineinkommen, ist es vollends unmöglich, daß Lommels Komplementärgleichung richtig sein kann.

Außerhalb der früher erwähnten Bestimmung der Wellenlängen der Komplementärfarben findet man in der Abhandlung von Helmholtz von 1855 einen Versuch, das Verhältnis zu bestimmen zwischen den Quantitäten, die man von den Komplementärfarben nehmen muß um Weiß zu bekommen. Diese Quantitätsbestimmung hat doch offenbar Helmholtz in keinem besonderen Grade interessiert; er gibt sie sehr schnell auf, nachdem er nachgewiesen hat, daß das Verhältnis zwischen den Quantitäten, die er von den Komplementärfarben nehmen mußte, um Weiß zu sehen, für vier von ihm untersuchte Komplementärpaare verschieden war und außerdem etwas mit der Beleuchtung variierte.[1]) —

Eine wirklich eingehende quantitative Bestimmung der Komplementärfarben findet man erst bei P. Glan[2]). Dieser ausgezeichnete Physiker war seiner Zeit voraus, insofern er klar einsah, daß man, um das Verhältnis zwischen den Quantitäten der Komplementärfarben auf entscheidende Weise bestimmen zu können, die Energieverteilung im benutzten Spektrum sowohl als die Absorption der Macula lutea und der Augenmedien berücksichtigen muß. Früher — das gilt also von einer genauen quantitativen Bestimmung der Komplementärfarben, die wir bei v. Kries und Frey finden[3]) — hatte man sich darauf beschränkt, die Quantitäten der Komplementärfarben in Spaltbreiten anzugeben, während Glan eine Umrechnung von Spaltbreite in retinale Energie vornimmt. — Methodisch betrachtet ist Glans Abhandlung also musterhaft, und er meint auch selbst, daß er, besonders indem er die Observationen von v. Kries und Frey benutzt, zu einem schönen Gesetze der Komplementärfarben gelange, indem er findet, daß gleichgroße Energien von den Farben in einem Komplementärpaare in die lichtperzipierende Schicht der Netzhaut hineindringen müssen, damit wir, wenn die Farben gemischt werden, Weiß sehen sollen. Dieses Resultat von Glan ist, wie wir später sehen werden, nicht richtig, und sein eigener Beweis dafür ist auch nicht zwingend. Man kann nämlich folgende Einwände dagegen erheben: erstens haben v. Kries und Frey bei ihren Versuchen als Lichtquelle ein weißes Stücklein

---

[1]) Übrigens ist es kaum zu bezweifeln, daß Helmholtz keine hinreichenden Quantitätsbestimmungen mittelst des Apparats bekommen konnte, den er damals benutzte. Merkwürdigerweise hat er nie diese Versuche wieder aufgenommen, nachdem er seinen berühmten Farbenmischungsapparat, „den Helmholtzschen", konstruiert hatte, der so vortrefflich für Quantitätsbestimmungen geeignet ist.

[2]) Pflügers Archiv, 1885, Bd. 39, und Wied. Ann. 1893, Bd. 48.

[3]) Du Bois-Reymonds Archiv, 1881.

Karton benutzt, das von weißem oder blauem Himmellicht beleuchtet wurde; und da wir früher gezeigt haben, daß man schwer eine hinreichend genaue Energiekurve für eine solche Lichtquelle bekommen kann (siehe die Erklärung zu Tabelle I), können schon aus dem Grunde ganz bedeutende Ungenauigkeiten in den Umrechnungen von Glan sich finden. Wesentlicher ist doch der Einwand gegen Glan, daß er, da er keine Bestimmungen der Maculaabsorption vorfand, selbst anfing diese Absorption mittels einer unrichtigen Methode zu bestimmen. Hierdurch werden sehr bedeutende Fehler eingeführt. Endlich sind an mehreren Punkten in der Abhandlung von Glan sehr wesentliche und unerklärliche Fehler bei der Umrechnung von Spaltbreite in Energie begangen; Glan hat selbst alle Data angegeben, die notwendig sind, um dieses nachzuweisen (s. Wied. Ann. Bd. 48. 1893). Deshalb muß man annehmen, daß der Gebrauch einer weniger genauen Energiekurve samt mißweisenden Absorptionszahlen für Macula lutea in Verbindung mit Rechenfehlern den vermeintlichen Beweis für Glans Gesetz ermöglicht hat, also den vermeintlichen Beweis, daß das Verhältnis zwischen den retinalen Energien der Komplementärfarben mit großer Annäherung = 1 gesetzt werden kann. Diese Kritik der Glanschen Abhandlung scheint mir nicht überflüssig, da man, so weit mir bekannt, früher die jedenfalls bei Glans Energieumrechnungen bedeutenden Rechenfehler nicht bemerkt hat. A. König hat seiner Zeit die Glansche Abhandlung sehr kurz gefaßt und nur referierend angemeldet, und bei Wundt finden wir in der letzten Ausgabe seiner großen physiologischen Psychologie (p. 156) eine Hinweisung auf und bedingten Anschluß an das Glansche Gesetz, ohne irgendwelche Kritik seiner Berechnungen. Wenn wir im folgenden die Untersuchung der quantitativen Komplementärbestimmungen wieder aufnehmen, werden wir sehen, daß man bei den neuesten Versuchen hierüber (in v. Kries Laboratorium) mit vollständiger Sicherheit nachgewiesen hat, daß Glans Gesetz unrichtig sein muß. Die retinalen Energieen der Komplementärfarben verhalten sich nicht zueinander wie 1; das Verhältnis zwischen diesen Energien ist dagegen für die verschiedenen Komplementärpaare verschieden.

§ 2.

Qualitative Komplementärbestimmungen.

Helmholtz' Bestimmung der Wellenlängen und die Hypothese, die etwas später Bezold vergebens daran zu knüpfen suchte, leiten die genaue qualitative Behandlung des Komplementärproblems ein. Das Interesse für die Komplementärfarben ist aber nach der Zeit stark abnehmend, indem die Farbentheoretiker sich anderen Pro-

blemen zugewendet haben, die ihnen bedeutungsvoller und vielleicht auch lösbarer schienen. Diese Bewegung vom Komplementärproblem weg ist natürlich und berechtigt, insofern man bei der Behandlung dieses Problems so auffällig davon abgeschnitten ist, Vorteil aus den Fortschritten der retinalen Anatomie zu ziehen. Es kommt mir indessen vor, daß es jetzt, wo man Klarheit über mehrere Fundamentalfragen in der Farbenlehre erreicht hat, an der Zeit sein wird, wieder seine Aufmerksamkeit auf die Komplementärfarben zu richten. Muß auch eingeräumt werden — und das kann keinem Zweifel unterliegen — daß wir vorläufig diesem Probleme nicht vollständig auf den Grund kommen können, so konnte es doch sein, daß eine Gruppierung und Generalisierung unserer Erfahrungen von den Komplementärfarben uns einen solchen Überblick über die hierher gehörigen Fakta geben würde, daß wir dadurch einen Schritt der endlichen Lösung näher kommen werden. Deshalb stellen wir es uns zur Aufgabe, folgende Fragen zu beantworten: welche Bedingungen in bezug auf Quantität und Qualität müssen erfüllt werden, damit wir durch Mischung zweier Spektralfarben Weiß bekommen können.

Wer im gegenwärtigen Zeitpunkt diese Frage zu beantworten versucht, wird den sehr wesentlichen Vorteil haben, daß mehrere Forscher nach Helmholtz sehr genaue und sorgfältige Versuche über die Komplementärfarben angestellt haben. Diese Versuche, die übrigens oft zu dem Zweck angestellt sind, eine der älteren Farbentheorien zu verteidigen oder anzugreifen, zeichnen sich besonders aus durch die vortreffliche Behandlung der qualitativen Seite der Sache, der Bestimmung der Wellenlängen der Komplementärfarben; die Quantitätsbestimmungen dagegen sind von weit geringerem Werte, was wir übrigens früher erwähnt haben. Außer Helmholtz' Bestimmungen der Wellenlängen der Komplementärfarben können wir uns jetzt auf Versuche stützen, die v. Kries, Frey, König und Dieterici angestellt haben, und von einem einzelnen dieser Observatoren, König, haben wir sogar zwei Versuchsreihen, die unter ein wenig verschiedenen Bedingungen und mit einem Zwischenraum von mehreren Jahren angestellt sind. Daß alle diese Bestimmungen so vortrefflich sind, wie oben gesagt, davon kann man sich leicht überzeugen, wenn man nach den gefundenen Zahlen für die Wellenlängen der Komplementärfarben (siehe Tabelle XV) die Komplementärkurven der verschiedenen Beobachter zeichnet[1]).

[1]) Glan hat auch die Wellenlängen für eine ganze Reihe Komplementärfarben bestimmt (siehe Pflügers Archiv, 1886, Bd. 39, p. 53—61), wir berücksichtigen aber nicht seine Resultate, da er seine Observationen nicht veröffentlicht hat, sondern nur die Kurve, die man seinen Observationen nachzeichnen kann. Außerdem geht

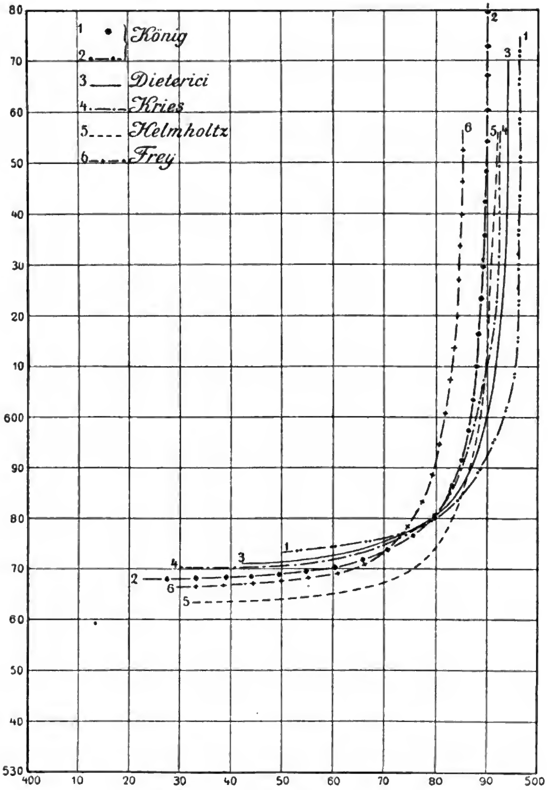


Fig. VIII.

aus Glans Versuchsbeschreibung hervor, daß er mit verhältnismäßig lichtschwachen Spektralfarben gearbeitet hat, was, wie wir später sehen werden, die Resultate in so wesentlichem Grade modifizieren kann, daß sie nicht ohne weiteres Versuchen gleichgestellt werden können, die bei mittelstarker Beleuchtung angestellt sind. — Von einem ähnlichen Einwand werden einige, übrigens weit weniger zuverlässige Versuche betroffen, die von Schelske angestellt worden sind (Wied. Ann. 1882, Bd. 16, p. 349—358).

Fig. VIII zeigt uns diese Kurven, und man sieht hieraus, daß wir offenbar hier einer Reihe besonders feiner Beobachtungen gegenüberstehen, weil alle diese Komplementärkurven in bezug auf die **Form** ganz übereinstimmend sind. Außerdem zeigt Fig. VIII, daß trotz der Übereinstimmung in der Form ein wesentlicher Unterschied stattfindet, nicht nur zwischen den Kurven bei den verschiedenen Observatoren, sondern auch zwischen den zwei Komplementärkurven bei **König**, indem alle Kurven etwas verschieden in dem Koordinatsystem placiert sind. Unsere erste Aufgabe wird deshalb sein, zu untersuchen, was wohl der Grund dazu sein kann, daß diese so gleichartigen und deshalb offenbar so genau bestimmten Kurven verschieden placiert sind.

Tabelle XV.[1])

König 1		König 2		Dieterici 3		v. Kries 4		Helmholtz 5		Frey 6	
λ_1	λ_2	λ_1	λ_2	λ_1	λ_2	λ_1	λ_2	λ_1	λ_2	λ_1	λ_2
675	496,5	681,8	490,1	670	494,3	656,2	492,4	656,2	492,1	656,2	485,2
663	495,7	663,7	490	660	494	626	492,2	607,7	489,7	626	484,6
650	496,7	645,9	489,7	650	494,3	612,3	489,6	585,3	485,4	612,[illegible]	483,6
638	495,9	629,7	489,2	635	494	599,5	487,8	573,9	482,1	599,5	481,8
615,3	496	614,7	488,3	626	493,1	587,6	484,7	567,1	464,5	587,6	478,9
582,6	483,6	601,2	486,9	610	492,2	579,7	478,7	564,4	461,8	586,7	478,7
578	476,6	588,9	484,6	588	485,9	577	473,9	563,6	43	577,7	473,9
576	467	578,4	478,2	585,7	485,7	575,5	469,3			572,8	469,3
574,5	455	570,8	462,5	578	476,6	572,9	464,8			570,7	464,8
573	450	568,2	436,8	575,6	470	571,1	460,4			569	460,4
		567,9	422,2	571,5	455	571	452,1			568,1	452,1
				571,3	448	570,4	440,4			566,3	440,4
				571,4	442	570,1	429,5			566,4	429,5

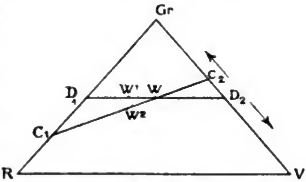
[1]) Siehe Helmholtz, Physiol. Optik, Ausg. II, p. 317—319 und (für 2) Sitzungsbericht der Berliner Akademie, 1896, Bd. 2, p. 945—950.

Wenn wir nun vorläufig von den zwei Versuchsreihen von König absehen, würde es ein sehr naheliegender Gedanke sein, die verschiedene Lage der Kurven unter der gewiß etwas unbestimmten Rubrik „individuelle Verschiedenheiten“ aufzuführen. Daß die Ursache hier liegen kann, ist übrigens schon im Jahre 1881 von v. Kries und Frey[1]) nachgewiesen worden, die auch die Abweichung zwischen ihren Komplementärkurven auf eine vollständig überzeugende Weise erklärt haben. Vergleicht man v. Kries und Freys Kurven (welche übrigens mit demselben Apparat und unter ganz gleichartigen Bedingungen gearbeitet haben), so wird man bei näherer Untersuchung sehen, daß der charakteristische Unterschied für die zwei Observatoren der ist, daß v. Kries die Farbentöne des Spektrums auf dieselbe Weise verschoben sieht, wie Frey sie sehen würde, wenn er Kom-

[1]) Du Bois-Raymonds Archiv. Physiol. Abt., p. 336—353.

plementärfarben bestimmt hätte, indem er ein gelbes Glas vor seine Augen gehalten hätte (siehe die Erklärung unten). Die zwei Schriftsteller erklären deshalb die Nichtübereinstimmung ihrer Bestimmungen so, daß v. Kries eine stärkere Pigmentierung der Macula lutea hat. Übrigens benutzen v. Kries und Frey bei ihrer Entwickelung hiervon Newtons Farbenkonstruktion; es wird nicht schwierig sein, die verschiedene Kurvenlage zu untersuchen, ohne seine Zuflucht dazu zu nehmen; doch da man auf diesem Wege eine gute Übersicht der Erscheinung bekommt, werden wir uns zu der Erklärung von v. Kries und Frey halten, die so lautet:

„Wir bedienen uns . . . der bekannten Newtonschen Konstruktion und untersuchen die Veränderungen der Komplementärgleichungen, wenn das Weiß durch irgend ein absorbierendes Medium verändert wird. Nehmen wir an, es sei beistehende Figur die für das ursprüngliche Weiß richtig konstruierte Farbentafel, *R*, *Gr*, *V* und *W* die Orte, bzw. des Rot, Grün, Violett und Weiß. In *W* schneiden sich bekanntermaßen die Linien, welche komplementäre Farbenpaare verbinden. Es werde nun da Weiß durch ein absorbierendes Medium so verändert, daß der Ort der veränderten Farbe in unserer Farbentafel W^1 ist. Gleichzeitig werden auch die Orte aller komplementären Farbenmischungen verändert werden. Wenn C_1 und C_2 eine solche Mischung war, deren Ort also ursprünglich in *W* lag, so wird jetzt C_2 und C_1 in ungleichem Verhältnisse geschwächt sein, es wird also der Ort der Mischung jetzt irgendwo anders auf der Verbindungslinie C_1, C_2 liegen, etwa im W^2. Man übersieht sofort, daß sie von W^1 (dem veränderten Weiß) verschieden ausfallen muß; man übersieht auch weiter, daß von allen Komplementärpaaren nur dasjenige noch zutreffend ist, auf dessen Linie das Weiß verschoben worden ist (D_1, D_2 in unserer Figur), und weiter, daß die Veränderung der Komplementärfarben sich in ganz bestimmter Weise gestaltet. Gehen wir von dem roten Ende des Spektrums aus, indem wir für jede Wellenlänge desselben die komplementäre suchen, so muß für den Teil von *R* bis D_1 die komplementäre Farbe gegen das weniger brechbare Ende, von D_1 bis ins Gelbgrün gegen das brechbarere Ende verschoben sein, so wie es die Pfeile der Figur andeuten. Man kann daher ganz allgemein den Satz aufstellen: Die di komplementären Farben darstellenden Kurven



für zwei verschieden zusammengesetzte Weiß schneiden sich in einem Punkte; die Koordinaten dieses Punktes geben an, wie gefärbt im Vergleich mit dem einen das andere Weiß ist (in welcher Richtung W^1 gegen W verschoben ist). Dies ist nun ganz der von uns beobachtete Fall; und zwar sind die von uns beobachteten Unterschiede derart, daß sie erklärt werden durch die Annahme, es gelange zu den perzipierenden Elementen des einen von uns (Kries) ein gelberes Licht als zu denen des anderen."

Aus dieser Erklärung sieht man unter anderem, welchen wesentlichen Einfluß es haben kann, bei Komplementärmischung ein verschiedenes — mehr oder weniger rein weißes — Vergleichslicht zu gebrauchen. Es reicht also nicht hin auf individuelle Verschiedenheiten (wie verschiedene Pigmentierung der Macula oder der Linse) hinzuweisen, um die verschiedene Placierung der Komplementärkurven zu erklären. Man wird nur einigermaßen sicher sein können, daß individuelle Abweichungen eine verschiedene Kurvenlage verursachen, wenn mehrere Beobachter mit demselben Apparat und unter gleichgearteten Verhältnissen gearbeitet haben. Dies ist der Fall bei v. Kries und Freys Versuchen — Kurve 4 und 6 — sowie bei Königs und Dietericis Versuchen — Kurve 1 und 3. —

Wenn König, wie gesagt, zu zwei ganz verschieden gelegenen Komplementärkurven kam bei Versuchen, die unter etwas verschiedenen Bedingungen und mit einem Zwischenraume von zirka zehn Jahren angestellt worden, so kann man dies auf verschiedene Weise erklären. Um mir womöglich Gewißheit dafür zu verschaffen, welche Erklärung man hier vorziehen soll, wandte ich mich schriftlich an Prof. König, da mir dies der einzige sichere Weg zu sein schien, um in der Placierungsfrage vollständige Aufklärung zu erhalten. Als Antwort auf diese Frage erhielt ich einen Brief, woraus ich ein Bruchstück anführen will, weil König hier für die verschiedene Placierung eine Erklärung sehr hervorhebt, die ich ganz übersehen hatte, und überhaupt eine Art Resumé gibt über die Erklärungen, die hier möglich sind. In diesem Briefe, der vom 6. Januar 1901 datiert ist, schreibt König folgendes:

„Was nun Ihre Frage selbst anbetrifft, so ist mir natürlich die Verschiebung der Kurve 2 gegen die Kurve 1 .... sofort aufgefallen, nachdem ich die Beobachtungen zu Kurve 2 beendet hatte. Ich habe mich aber gar nicht darüber erstaunt, denn 1. bezieht sich Kurve 1 auf ein größeres Mischungsfeld, welches die Fixationspunkte in der Mitte enthält, während bei Kurve 2 das Feld viel kleiner ist und extrafoveal liegt. Für jeden, der eine einzige größere Reihe von Komplementarfarben selbst genau bestimmt hat, ist da-

mit schon die Verschiedenheit erklärt. Man braucht aber nur einmal eine Komplementärgleichung nach Modell 1 hergestellt zu haben und dann unter Verkleinerung des Feldes und Änderung des Fixationspunktes, also nach Modell 2, zu betrachten, so hat man sofort eine augenfällige Verschiedenheit zwischen den vorher völlig gleichen Feldhälften.[1]) — II. liegt aber auch keine Garantie vor, daß das bei eins bebenutzte Weiß völlig identisch mit dem bei 2 benutzten war. Bei 1 wurde direktes Sonnenlicht (bei unbewölktem Himmel, aber nur die Strahlen der Sonne selbst) auf ein mit Magnesiumoxyd überzogenes Papier geleitet, während bei 2 das Licht einer käuflichen Lichtquelle dem natürlichen Sonnenlichte nach Möglichkeit gleich gemacht war und als Vergleich benutzt wurde. Wenn man selbst gesehen hat, wie das Auftauchen einer einzigen größeren Wolke am Himmel Komplementärfarbengleichungen zerstört, ... so ist man schließlich erstaunt, daß die erhaltenen Kurven so glatt sind. Trotzdem bin ich der Ansicht, daß der weitaus größte Teil der Verschiedenheit von 1 und 2 nicht durch den Umstand ***II***, sondern durch ***I*** herbeigeführt worden ist. — Ein Zunehmen des Gelbsehens habe ich bei mir seit dem Jahre 1884 .... noch nicht konstatieren können."

Indem wir hiermit wenigstens das wesentlichste der Ursachen besprochen haben, die eine verschiedene Placierung der Komplementärkurven zur Folge haben können, wollen wir jetzt diese Kurven näher untersuchen, indem wir unsere Aufmerksamkeit ihrer besonderen, bei den verschiedenen Beobachtern ganz übereinstimmenden Form zuwenden. Wie oben gesagt, kam Bezold, indem er Helmholtz' Komplementärkurve betrachtete, zu dem Resultate, daß diese Kurve eine Hyperbel sei; wir haben indessen gezeigt, daß die Hyperbelgleichung, mit der Bezold sich versucht, schon wegen ihrer Asymmetrie nicht richtig sein kann. Daraus folgt jedoch nicht, daß eine Hyperbelgleichung hier überhaupt unmöglich ist; aber man muß jedenfalls zuerst die Forderung stellen, daß die Gleichung, die die Beobachtungen über die Wellenlänge

---

[1]) König spricht nicht direkt davon, warum eine kleine Verschiebung des Fixationspunktes die Komplementärgleichungen modifiziert. Er findet, soweit ich schließen kann, die Ursache darin, daß der gelbe Farbstoff in der Macula lutea vom Zentrum der Macula gegen ihre Peripherie gleichmäßig abnimmt (siehe Graefe-Saemisch, Handb. usw., p. 171 f.). Ist diese Erklärung richtig, so muß man mehr gelb sehen, wenn man am Zentrum fixiert — Kurve 1 — als wenn man etwas extrafoveal sieht — Kurve 2 —. Wenn man einen Blick auf Fig. IX wirft, wird man sehen, daß dies auch der Fall ist (vgl. Kries' und Freys Kurven, 4 und 6).

der Komplementärfarben zufrieden stellen soll, eine symmetrische Gleichung sein muß.

Schon etwas früher, als ich Bezolds Abhandlung gelesen hatte, war ich bei der Betrachtung von Helmholtz' Komplementärkurve zu der Überzeugung gekommen, daß Helmholtz' Observationen befriedigt werden können durch die Gleichung für eine gleichseitige Hyperbel. Man kann indessen unter der Voraussetzung, daß wir es hier mit einer gleichseitigen Hyperbel zu tun haben, gleich feststellen, daß diese Hyperbel — gleichwie jede andere Gleichung, die die Observationen über die Wellenlängen der Komplementärfarben (λ' nnd λ'') zufriedenstellen soll — symmetrisch sein muß und deshalb Asymptoten haben muß, die mit den Koordinatachsen parallel sind, sowie daß die Koordinaten des Zentrums gleich groß sein müssen, d. h. gleich einer Konstanten, die wir c nennen. Das folgt daraus, daß jede Farbe die Komplementärfarbe ihrer Komplementärfarbe sein wird; wenn λ' eine bestimmte Funktion von λ'' ist, $[\lambda' = f(\lambda'')]$, wird λ'' auch dieselbe Funktion von λ' sein $[\lambda'' = f(\lambda')]$. Die geometrische Konsequenz hieraus, die im Begriff des Komplementarismus liegt, wird sein, daß die Kurve $\lambda'' = f(\lambda')$ zur Symmetrieachse eine gerade Linie haben wird, die durch den Anfangspunkt des Koordinatensystems geht und einen Winkel von 45^0 bildet, sowohl mit der Abszisse als mit der positiven Richtung der Ordinatenachse. Bezeichnet man nun die Länge des Durchmessers, der die Scheitelpunkte der Hyperbel verbindet, mit 2a, so wird die Gleichung der supponierten gleichseitigen Hyperbel (indem die Koordinaten des Zentrums ja gleich groß $= c$ sind) folgende:

$$(\lambda' \div c)(\lambda'' - c) = \div \frac{a^2}{2}$$

Um zu prüfen, ob diese Hypothese richtig ist, also um zu sehen, ob eine solche Hyperbelgleichung die verschiedenen Observationen über die Wellenlängen der Komplementärfarben befriedigt, muß man die Methode der kleinsten Quadrate benützen. Dies ist etwas weitläufig, weil wir hier mit einer Gleichung zu tun haben, deren Konstanten in höherer Potenz vorkommen als in der ersten, aber es ist der einzige sichere Weg, um zu entscheiden, wie große Wahrscheinlichkeit dafür vorhanden ist, daß die Hypothese richtig ist. Wir wenden deshalb die Methode der kleinsten Quadrate an, indem wir mit Helmholtz' Beoabachtungen beginnen.

Um für die Konstanzen c und a eine vorläufige approximative Bestimmung zu erhalten, setzt man die Wellenlänge für zwei komplementäre Farbenpaare in die Hyperbelgleichung ein; man kann z. B. für Benützung der ersten und sechsten der Komple-

mentärpaare entscheiden, die Helmholtz bestimmt hat. Dadurch erhält man die Gleichungen:

$$(656{,}2 - c)\ (492{,}1 - c) = \div \frac{a^2}{2}$$

$$(564{,}4 - c)\ (461{,}8 - c) = \div \frac{a^2}{2}$$

Bezeichnet man nun die aus diesen Gleichungen gefundenen Werte für c und a beziehungsweise mit C und A [$C = 510{,}042$, $A = 72{,}417$], so wird man die wirklichen Werte der zwei Konstanten bezeichnen können mit $c = C + \gamma$ und $a = A + \alpha$, und wir suchen sodann die Werte von γ und α, die die Summe der Quadrate der Observationsfehler zu einem Minimum machen.

Man findet, daß diese Werte sind: $\gamma = 13{,}993$, $\alpha = 5{,}065$, woraus folgt:

$$a = A + \alpha = \ \ 72{,}417 + \ \ 5{,}065 = \ \ 77{,}5$$
$$c = C + \gamma = 510{,}042 + 13{,}993 = 524{,}0$$

Diese Werte für a und c werden nun in die benutzten Formeln statt A und C eingesetzt, und man erhält dadurch als zweite Approximation:

$$a = 74{,}3917;\ c = 524{,}0365.$$

Aus diesen zwei Werten für a und c berechnet man sodann die Werte λ'', die Helmholtz' λ' entsprechen, wodurch man folgende Tabelle erhält:

Tabelle XVI.

Helmholtz.

$a = 74{,}3917$; $c = 524{,}0365$.

observ. λ'	observ. λ''	berechn. λ''	Fehler
656,2	492,1	503,10	+ 11,00
607,7	489,7	490,96	+ 1,26
585,3	485,4	478,87	÷ 6,53
573,9	482,1	468,54	÷ 13,56
567,1	464,5	459,78	÷ 4,72
564,4	461,8	455,48	÷ 6,32
563,6	433	455,00	+ 22,00

Bevor wir davon sprechen, welche Bedeutung man diesen Fehlern beilegen kann, wollen wir eine ähnliche Untersuchung vornehmen, um auch die observierten und berechneten λ'' für die Komplementärzahlen zusammenstellen zu können, die beziehungsweise von v. Kries, Frey, König[1]) und Dieterici gefunden sind. Bei dieser Berechnung wollen wir dieselben Werte für A und C benutzen, die bei der zweiten Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate auf Helmholtz' Observationszahlen gebraucht wurden

[1]) Was König betrifft, beschränken wir uns darauf, die Observationen zu benutzen, die der Kurve 1 (siehe Fig. VIII) zugrunde liegen.

($A = 77{,}5$, $C = 524{,}0$). Dadurch kommen wir zu folgenden Tabellen (XVII—XX).

Tabelle XVII.

v. Kries.

$a = 79{,}68868$; $c = 529{,}46780$.

observ. λ'	observ. λ''	berech. λ''	Fehler
656,2	492,4	504,41	+ 12,01
626	492,2	496,58	+ 4,38
612,3	489,6	491,14	+ 1,54
599,5	487,8	484,13	÷ 3,67
587,6	484,7	474,85	÷ 9,85
579,7	478,7	466,26	÷ 12,44
577	473,9	462,66	÷ 11,24
575,5	469,3	460,49	÷ 8,81
572,9	464,8	456,36	÷ 8,44
571,1	460,4	453,20	÷ 7,20
571	452,1	453,01	+ 0,91
570,4	440,4	451,89	+ 11,49
570,1	429,5	451,32	+ 21,82

Tabelle XVIII.

Frey.

$a = 79{,}87937$; $c = 521{,}11617$.

observ. λ'	observ. λ''	berech. λ''	Fehler
656,2	485,2	497,50	+ 12,30
626	484,6	490,70	+ 6,10
612,3	483,6	486,13	+ 2,53
599,5	481,8	480,42	÷ 1,38
587,6	478,9	473,13	÷ 5,77
586,7	478,7	472,47	÷ 6,23
577,7	473,9	464,74	÷ 9,16
572,8	469,3	459,39	÷ 9,91
570,7	464,8	456,77	÷ 8,03
569	460,4	454,49	÷ 5,91
568,1	452,1	453,21	+ 1,11
566,3	440,4	450,50	+ 10,10
566,4	429,5	450,66	+ 21,16

Tabelle XIX.

König.

$a = 78{,}34937$; $c = 522{,}17032$.

observ. λ'	observ. λ''	berech. λ''	Fehler
675	496,5	502,09	+ 5,59
663	495,7	500,38	+ 4,68
650	496,7	498,16	+ 1,46
638	495,9	495,67	÷ 0,23
615,3	496	489,21	÷ 6,79
582,6	483,6	471,38	÷ 12,22
578	476,6	467,19	÷ 9,41
576	467	465,15	÷ 1,85
574,5	455	463,52	+ 8,52
573	450	461,79	+ 11,79

Tabelle XX.

Dieterici.

$a = 79{,}21541$; $c = 523{,}64262$.

observ. λ'	observ. λ''	berech. λ''	Fehler
670	494,3	502,20	+ 7,9
660	494	500,63	+ 6,63
650	494,3	498,81	+ 4,51
635	494	495,46	+ 1,46
626	493,1	492,98	÷ 0,12
610	492,2	487,30	÷ 4,90
588	485,9	474,88	÷ 11,02
585,7	485,7	473,08	÷ 12,62
578	476,6	465,92	÷ 10,68
575,6	470	463,25	÷ 6,75
571,5	455	458,08	+ 3,08
571,3	448	457,80	+ 9,80
571,4	442	457,94	+ 15,94

Aus diesen Tabellen, die die Übereinstimmung zwischen den berechneten und observierten Werten von λ'' zeigen, kann man bei näherer Untersuchung sehen, daß eine Verifikation der Hyperbelhypothese besonders folgenden zwei Schwierigkeiten begegnen wird: I. sind die Fehler (die Differenz zwischen den berechneten und observierten Werten von λ'') in gewissen Teilen der Komplementärkurve ziemlich groß; II. ist in allen diesen Tabellen ein bestimmter „Gang“ in den Fehlern. Wir wollen jede dieser zwei Einwendungen für sich betrachten.

Ad. I. Hinsichtlich der ersten Einwendung, daß die Fehler allzu groß sind, wollen wir auf einige Untersuchungen hinweisen, die

von König und auch von Glan angestellt wurden und jedenfalls erklären können, warum die Fehler so groß werden müssen, wo die Komplementärkurve sich asymptotisch den Koordinatachsen nähert. Sowohl König[1]) als auch Glan[2]) haben gefunden, daß der Farbenton an beiden Grenzen des Spektrums sich auf einer längeren Strecke nicht verändert. Alle Farbentöne, die auf diesen zwei Endstrecken liegen, sind deshalb — subjektiv gesehen — nur verschieden mit Rücksicht auf den Stärkegrad, während sie natürlich — objektiv gesehen — etwas verschiedenen Wellenlängen entsprechen. Infolgedessen wird — etwas, wovon man sich übrigens leicht durch ein Experiment überzeugen kann — allen Farben auf der einen Endstrecke nur eine gemeinsame Komplementärfarbe mit unveränderter Wellenlänge, aber wechselnder Lichtstärke entsprechen und ganz dasselbe gilt auch für die andere Endstrecke; auch hier gibt es nur eine gemeinsame Komplementärfarbe. Sowohl Glan als König stellen fest, daß die Wellenlängen für diese Endstrecken liegen zwischen: äußerstem Rot und 650 $\mu\mu$
sowie äußerstem Violett und 430 $\mu\mu$.

Hieraus folgt, daß die „Hyperbel“ der Komplementärfarben innerhalb dieser Grenzen, also jenseits 650 und 430, durch gerade Linien substituiert werden muß, die parallel mit den Koordinaten sind. Hieraus versteht man die Bedeutung der auffallend großen Abweichungen von der berechneten Hyperbel (Fehler), die gegen die Außenpunkte des Spektrums hin vorkommen. Diese Konstanz im Farbentone (nahe den Grenzen des Spektrums) stimmt übrigens vollkommen überein mit dem, was wir in anderen Sinnesbereichen beobachten. Sobald wir uns der Grenze nähern, wo die physischen Einwirkungen aufhören, auf uns Eindruck zu machen, wird die Abschätzung der Qualitäten höchst unsicher. Wollen wir daher die Komplementärkurve so korrekt als möglich haben, so müssen wir bei Berechnung der Hyperbel die Observationen ausschließen, wo eine von den in einem Komplementärfarbenpaar beobachteten Farben auf die Endstrecken des Spektrums fällt. Bei einigen Berechnungen, die ich ausschließlich mit den Observationen vornahm, die innerhalb der Endstrecke liegen, zeigte es sich auch, daß die Fehler, wenn man so vorgeht, bedeutend kleiner werden, ohne daß dies übrigens auf den „Gang der Fehler“ Einfluß hat, der gleich hervortretend bleibt, auch wenn man die Endstrecken ausschließt.

Ad. II. Wir gehen nun über zur anderen Einwendung, die man gegen die Verifikation der Hyperbelhypothese machen kann,

[1]) Zeitschr. usw. 1893, Bd. 4, p. 283.
[2]) Pflügers Archiv. 1886, Bd. 39, p. 54.

und untersuchen, welche Bedeutung man dieser Einwendung beimessen kann. Die Tabellen zeigen, daß eine regelmäßige und gleichgeartete Verteilung der positiven und negativen Fehler stattfindet, die bei allen diesen Berechnungen für jeden einzelnen Beobachter deutlich hervortreten. Da wir es nun hier zweifelsohne mit sehr fein ausgeführten Beobachtungen zu tun haben — worauf man aus der gegenseitigen Übereinstimmung der Komplementarkurven rücksichtlich der Form schließen kann —, konnte es scheinen, diese regelmäßige Fehlerverteilung bedeute, daß die Hyperbeltheorie unhaltbar sei. Sieht man die Sache rein physisch an, betrachtet man die Komplementärbestimmungen als auf einer Linie mit jeder andern guten physischen Versuchsreihe stehend, so ist es offenbar, daß ein solcher Schluß nahe liegen konnte. Von einem physiologischen Standpunkte nimmt sich die Frage indessen ganz anders aus. Hat man mit einiger Aufmerksamkeit die Wege verfolgt, auf denen die Farbenlehre sich zu ihrer jetzigen, bedeutend verbesserten Stellung vorwärts gearbeitet hat, so wird man daraus gelernt haben, wie oft kleine, scheinbar recht unbedeutende Veränderungen der Versuchsbedingungen (z. B. Änderungen betreffs der Adaptation) die Resultate auf entscheidende Weise verändern können. Für eine physiologische Betrachtung wird daher der genannte Gang in den Fehlern nicht gleich als entscheidender Gegenbeweis gegen die Hyperbelhypothese gelten; dies würde man von einem solchen Standpunkt aus als einen etwas übereilten Schluß betrachten. Man würde sich nämlich zuerst für verpflichtet erachten, zu untersuchen, ob die nicht besonders bedeutende, aber regelmäßige Abweichung zwischen Beobachtung und Theorie (der Gang in den Fehlern) nicht aus einem ebenso regelmäßig auftretenden, störenden oder modifizierenden Umstand sollte erklärt werden können. Infolge einer solchen Betrachtung begann ich daher zu erwägen, ob sich nicht unter den zahlreichen, eigentümlichen Veränderungen, die unter verschiedenen Umständen mit unseren Farbenempfindungen vor sich gehen, eine einzelne finden sollte, die wenigstens teilweise den erwähnten Gang in den Fehlern erklären könnte. Nach mehreren vergeblichen Versuchen, so etwas zu finden, gelang es mir endlich, indem ich einem von Bezold gegebenen Winke folgte¹).

Es ist schon vor einigen Jahren und vielleicht noch früher festgestellt worden, daß die Farbenempfindungen, die durch Betrachtung eines mittelmäßig starken Spektrums hervorgerufen werden, nicht unverändert bleiben, wenn die Beobachtung verlängert und das

¹) [illegible]

Spektrum mit dunkel adaptiertem Auge betrachtet wird. Wir haben früher erwähnt, daß das Lichtmaximum im Spektrum in diesem Falle sich von Grün gegen Blau hin verschiebt, aber außer dieser Veränderung der relativen Lichtverteilung treten auch sehr erkennbare Farben ton veränderungen ein. Betrachten wir ein lichtschwaches Spektrum mit dunkel adaptiertem Auge, so sehen wir an der Stelle, wo wir bei mittelstarker Beleuchtung Gelb sahen ($\lambda =$ ca. 590), jetzt nicht Gelb, sondern Orangegelb; an der Stelle, wo wir bei mittelstarker Beleuchtung Orangegelb ($\lambda =$ ca. 600) sahen, sehen wir nun Rot usw.; der Farbenton in dem am wenigsten brechbaren Teil des Spektrums verschiebt sich kurz gesagt, wenn die Beleuchtung herabgesetzt wird, gegen Ultrarot hin. Diese Verschiebung ist recht erkennbar und kann auch bei Versuchen mit guten Pigmentfarben gesehen werden. Etwas schwieriger ist es, die Verschiebung des Farbentons zu beobachten, die in dem brechbarsten Teile des Spektrums stattfindet, aber man hat doch durch aufmerksame Betrachtung festgestellt, daß die Farben, die bei mittelstarker Beleuchtung bläulich sind, einen mehr rötlichen Schein erhalten (violett werden), wenn die Beleuchtung herabgesetzt wird. — Die grünen Farben dagegen verändern bei Beleuchtungsvariation nur ihre Lichtstärke, nicht ihren Farbenton[1]). Diese Beobachtungen über die Wanderungen der Farbentöne kann man, wie mir vorkommt, resümieren, indem man sagt: ein lichtschwaches Spektrum sieht man mit einer Verteilung der Farbentöne, die gleich der ist, die man sehen wird, wenn man ein purpurrotes Glas vors Auge hält und ein Spektrum bei mittelstarker Beleuchtung betrachtet. Das rote Glas wird alle Farben des Spektrums — mit Ausnahme der grünen — mehr rötlich machen, was gerade das Charakteristische ist bei den Farbenverschiebungen, die vor sich gehen, wenn ein Spektrum lichtschwach wird, und man es mit dunkel adaptiertem Auge betrachtet.

---

[1]) In Brückes Physiologie der Farben, 1887, Aufl. 2, findet man p. 185 f. einige Bemerkungen über die Rolle, die die Farbenverschiebung bei der malerischen Wiedergabe der Natur spielen kann. Brücke schreibt darüber folgendes: „Wenn wir Draperien von einfarbigen Stoffen betrachten, so werden wir bemerken, daß die hellen und dunkeln Partien derselben nicht durchweg einer Schattierung angehören. Es ist dies nicht nur in Glanzlichtern und Reflexionen der Fall, in denen oft von der Lokalfarbe ganz verschiedene Tinten auftreten, sondern auch in den helleren und dunkleren Partien als solchen. Am besten erfährt dies der Maler, der den Effekt des Ganzen mit Farben auf der Leinwand wiedergeben soll. Die ältesten Meister malten viel mehr in einer Schattierung fort als die späteren . . . . einige neuere Meister haben es sich zur Regel gemacht, wiederum weniger von der Lokalfarbe abzuweichen, aber auch sie mußten der Naturwahrheit Opfer, wenn auch kleinere bringen! Auch sie können z. B. ein blaues oder rotes Gewand, das teilweise sehr schwach, teilweise sehr stark beleuchtet ist, nicht streng in einer Schattierung durchmalen."

Es läge nun nahe, zu untersuchen, ob diese regelmäßige Verschiebung des Farbentones nicht sollte die Hauptabweichung zwischen den gefundenen Komplementärkurven und der berechneten Hyperbel erklären können, es läge nahe, zu untersuchen, ob nicht der Gang in den Fehlern vollständig verschwinden würde, sobald man Komplementärfarben bei herabgesetzter Beleuchtung bestimmt. Indessen muß man im voraus darüber klar sein, daß einer solchen Annahme die zum Teil noch unbewiesene Behauptung zugrunde liegt, daß der Komplementarismus fester an den Farbenton als an die Wellenlänge geknüpft ist, so daß z. B. gewisse rote und blaugrüne Farbentöne komplementär sein werden, selbst wenn die entsprechenden Wellenlängen unter gewissen Umständen etwas variieren können. Daß der Komplementarismus in erster Linie an den Farbenton geknüpft ist, ist keine ungewöhnliche Annahme, und wir haben zudem einen vorläufigen experimentalen Beweis dafür in einem von E. Tonn[1]) angestellten Versuche, wodurch dieser Autor zeigt, daß namentlich die Komplementärfarbe zu $\lambda = 670$ bei abnehmender Beleuchtung sich ein bedeutendes Stück gegen das am wenigsten brechbare Ende des Spektrums hin verschiebt.

Es könnte, wie gesagt, nahe liegen, den Gang in den Fehlern zu erklären mit Hinweis auf die erwähnte Farbentonverschiebung, und ich habe es dann auch zu tun versucht. Bevor wir indessen die verhältnismäßig weitläufige, experimentale Untersuchung über Komplementärfarben bei verschiedenen Beleuchtungen diskutieren wollen, welche zeigte, daß jede Spur von Gang in den Fehlern verschwindet, wenn man Komplementärfarben bei stark herabgesetzter Beleuchtung bestimmt, wollen wir einen Augenblick bei dem hier besprochenen Faktum selbst, bei der Farbentonverschiebung, stehen bleiben und die Ursache dieser Verschiebung herauszufinden suchen.

Soweit ich sehen kann, ist hier bei unserem jetzigen Wissen nur eine Erklärung möglich. Um diese Erklärung finden und deren Bedeutung diskutieren zu können, müssen wir, uns an die vorausgegangenen Untersuchungen erinnernd, den Einfluß erwägen, den die verschiedenen Pigmente im Auge haben können. Es wurde früher hervorgehoben, daß die Macula lutea und zuweilen auch die Linse eine nicht unbedeutende Menge blaue Strahlen absorbieren, und wir haben desgleichen erwähnt, daß der Sehpurpur im Außenglied der Stäbchen die verschiedenen Spektralfarben auf verschiedene Weise absorbiert, wie auch die Bedeutung, die dies hat für die Bestimmung der Schwellenwerte von Farben mit neutraler Qualität.

[1]) Zeitschr. usw. 1894, Bd. 7.

Zur Beleuchtung des Phänomens, das wir hier untersuchen, der Farbentonverschiebung, wollen wir indessen unsere Aufmerksamkeit wieder einem einzelnen der genannten Pigmente, nämlich dem Sehpurpur zuwenden, der auf eine bisher unbeachtete Weise mittels seiner besonderen Farbe (Purpurrot) modifizierend auf unsere Auffassung der Spektralfarben einwirken kann. Nehmen wir nämlich an, daß das Tageslicht in der Dämmerung durch die lichtbrechenden Medien des Auges in dieses eindringt und zum Sehpurpur hineingelangt, wovon ein reichlicher Vorrat vorhanden sein wird, wenn das Auge dunkel adaptiert ist. In diesem Falle wird der Sehpurpur wenigstens einiges purpurfarbiges Licht in verschiedenen Richtungen zurückwerfen und ausstrahlen, und vor allem wird der Sehpurpur von der vordersten peripherisch liegenden Partie der Netzhaut verhältnismäßig viel purpurrotes Licht durch den Glaskörper auf den zentralen Teil der Netzhaut hinwerfen. Wegen dieses Zurückwerfens des Lichts vom Sehpurpur wird das Spektrum in der Dämmerung — ja überhaupt immer, wenn das Auge dunkel adaptiert ist — so verändert werden, daß die ursprünglichen Spektralfarben, d. h. das Spektrum, gesehen bei mittelstarker Beleuchtung, auf gleiche Weise modifiziert werden, als ob zu jeder einzelnen Spektralfarbe ein wenig purpurrotes Licht hinzugefügt würde. Das Dämmerungsspektrum wird also eine ähnliche Farbenverteilung erhalten wie die, welche das Spektrum bei mittelstarker Beleuchtung erhalten würde, wenn es durch ein purpurrotes Glas betrachtet würde. Die Voraussetzung dafür, daß diese theoretische Betrachtung hier praktische Bedeutung erhalten kann, wird jedoch sein, daß das Quantum Licht, das vom Sehpurpur reflektiert wird, so bedeutend ist, daß die Zugabe von Purpurrot auf unsere Farbenempfindungen wird influieren können. — Um näher zu begründen, daß der Einfluß des Sehpurpurs auf die Farbentonverschiebung auch annehmbarerweise bei Komplementärbestimmungen eine Rolle spielen kann, wollen wir erwägen, wie die Versuchsbedingungen im allgemeinen sind in dem Augenblick, wo man Komplementärfarben bei herabgesetzter Beleuchtung bestimmt. Vorausgesetzt, daß es eine zentrale Observation ist, wird bei solchen Versuchen im Auge des Beobachters ein zirkuläres Netzhautbild mit Fovea als Zentrum gebildet. Die eine Hälfte, *A*, dieses zirkulären Netzhautbildes denken wir uns beleuchtet von zwei zusammengemischten Komplementärfarben, während die andere Hälfte, *B*, von dem bei solchen Versuchen unentbehrlichen weißen Vergleichslicht beleuchtet ist. Der Sehpurpur, der auf dem Bilde *B* placiert ist, wird nun purpurfarbiges Licht an die Seitenpartien und den vordersten Abschnitt der Netzhaut ausstrahlen, und von dort wird wieder ein Teil purpurfarbiges Licht

auf das Bild A zurückgeworfen werden, wo es sich mit den zwei Komplementärfarben vereinigt[1]).

§ 3.

Experimentale Untersuchungen.

Gestützt auf die Gründe, die im vorhergehenden Paragraph besprochen wurden, begab ich mich daran, eine experimentale Bestimmung der Komplementärfarben vorzunehmen, indem diese Farben bei verschiedenen Beleuchtungen untersucht wurden.

Der Zweck dieser experimentalen Untersuchung war indessen nicht bloß, die Hyperbelhypothese zu verifizieren, indem ich einen Nachweis versuchte, daß der vorfindliche Gang in den Fehlern verschwinde, sobald man mit einer Komplementärkurve rechnet, die bei herabgesetzter Beleuchtung bestimmt ist; ich stellte mir außerdem die Aufgabe, auch das Komplementärproblem, von der quantitativen Seite betrachtet, zu untersuchen. Es kann hier eine experimentale Lösung verschiedener Fragen zur Sprache kommen. Was am nächsten liegt, wird offenbar sein, Glans Untersuchungen neuerdings in Erwägung zu ziehen, also zu untersuchen, welches Verhältnis obwaltet zwischen den Energien, womit die Komplementärfarben auf die Netzhaut (nicht auf die Hornhaut) einwirken müssen, damit wir Weiß sehen können. Glan hat, wie wir gesehen, den Satz zu beweisen versucht, daß gleich große Energien zur lichtperzipierenden Schicht der Netzhaut hineindringen müssen, damit zwei Komplementärfarben Weiß geben können. Da man indessen diese Verifikation nicht als überzeugend betrachten kann, war Grund dazu vorhanden, mit Hilfe einer experimentalen Untersuchung zu versuchen, diesem Satze Glans gegenüber Stellung zu nehmen.[2])

Es können indessen auch andere quantitative Untersuchungen zur Sprache kommen, wenn man Komplementärgleichungen bestimmt. — Man kann wohl die Frage über die „Weißvalenzen" der Komplementärfarben als abgetan betrachten; Hering und Heß geben an, gefunden zu haben, daß die Weißvalenzen der Komplementärfarben gleich groß sind; da man aber nicht sehen kann, mit wie großer Annäherung Hering und Heß dieses Gesetz richtig gefunden haben (da diese Autoren die bei ihren Versuchen gefundenen Zahlen nicht veröffentlicht haben), wird man dazu berechtigt sein, auf

[1]) Wegen des großen relativen Unterschieds zwischen den Brechungs-Koeffizienten der Kristallinse und des Glaskörpers wird zudem ein Teil des purpurfarbigen Lichtes, das (von *B* und anderen Teilen der Netzhaut) die hinterste Fläche der Linse trifft, auch auf das Bild *A* zurückgeworfen werden.

[2]) Graefes Archiv, 1889, Bd. 35, Abt. 2, p. 1—62.

den experimentalen Gegenbeweis, den König geliefert hat[1]), großes Gewicht zu legen. Es kann nach Königs Versuchen nicht davon die Rede sein, daß die Weißvalenzen der Komplementärfarben gleich groß sind. — Selbst wenn man indessen Herings und Heß' Satz über die weißen Valenzen der Komplementärfarben aufgeben muß, wird dennoch Grund dazu vorhanden sein, sehr ähnliche Untersuchungen vorzunehmen, indem man versuchen kann, eine Behauptung zu beweisen, die Ebbinghaus einmal aufgestellt hat. Wir wollen annehmen, daß wir durch Mischung von zwei Farben Weiß gebildet haben; vergleichen wir nun die eine dieser Farben mit weißem Licht, so finden wir, daß sie einem Weiß gleich ist, z. B. von der Helligkeit h_1; vergleichen wir die andere, damit komplementäre Farbe mit Weiß, so finden wir, daß sie gleich ist einem Weiß von der Helligkeit h_2, und vergleichen wir endlich die Komplementärmischung mit Weiß, so finden wir, daß die Mischung gleich ist einem weißen Lichte von der Helligkeit H; zwischen den drei Größen h_1, h_2 und H wird, wenn Ebbinghaus' Behauptung richtig ist, folgende Abhängigkeit sein: $h_1 + h_2 = H$.

Ebbinghaus schreibt hierüber in Zeitschr. f. Psychol. und Physiol. der Sinnesorgane Bd. 5, 1893. p. 176—177, folgendes: „Nun behaupte ich, und das ist eben der Satz, den ich hier nur behaupte und nicht beweise: wenn Komplementärfarben zu Weiß gemischt werden, so ist die Helligkeit der Mischung (mindestens annähernd) gleich der Summe der Helligkeiten der Komponenten. Die Helligkeiten (und nicht, wie Hering will, die weißen Valenzen) von Komplementärfarben, die Helligkeiten bei eben der Lichtintensität, bei der die Mischung geschieht, sind das, was maßgebend ist für die Helligkeit des aus ihnen gemischten Grau; sie setzen sich einfach zusammen zu der Helligkeit der Mischung.[2]) Ein befriedigender experimenteller Beweis dieses Satzes ist schwierig, weil die Feststellung der Helligkeit einer Farbe bei gewöhnlichem Lichte eine unsichere Sache ist."

Ebbinghaus findet diesen Satz — den wir Ebbinghaus' Satz nennen wollen — einigermaßen bestätigt bei Rood,[3]) da aber dieser Autor nur mit Pigmentfarben gearbeitet hat, mißt

[1]) Sitzungsber. d. Berliner Akad. 1896, Bd. 2, p. 945—950 (siehe die Werte für W_1 und W_2 in Königs Tabelle).

[2]) Ebbinghaus knüpft an dieses Postulat folgende historische Bemerkung (p. 177): „So viel würde übrig bleiben von dem bekannten Graßmannschen Satz, daß die gesamte Lichtintensität einer Mischung von Farben gleich ist der Summe der Intensitäten der Komponenten (Pogg. Ann. 1853, Bd. 89, p. 83). Für die Mischung kurzwelliger Farben untereinander oder langwelliger Farben untereinander ist der Satz falsch, nur für den bestimmten Fall der Komplementärfarben gilt er."

[3]) Sillimanns Journ. (3), 1878, XV, p. 81.

Ebbinghaus dem nicht mehr Bedeutung bei als einer Annäherung, die er selbst fand, indem er auch mit Pigmentfarben arbeitete. —

Um über alle diese verschiedenen Fragen Klarheit zu bekommen, muß man also das Komplementärproblem von verschiedenen Seiten untersuchen: 1. Wir müssen erstens die Wellenlängen der Komplementärfarben bei variierender Beleuchtung bestimmen, um zu sehen, ob die Komplementärkurve bei stark herabgesetzter Beleuchtung sich so sehr verändert, daß sie eine genaue Hyperbel wird. 2. Außerdem müssen wir, um zu sehen, mit wie großer Annäherung Ebbinghaus' Satz gilt, nicht nur jede einzelne Farbe in den verschiedenen Komplementärpaaren vergleichen mit Weiß, sondern wir müssen auch die Komplementärmischung mit Weiß vergleichen (um die Größen zu finden, die wir h_1, h_2 und H nannten). 3. Endlich sollte man, um zu prüfen, ob Glans Satz richtig ist, herauszufinden trachten, welche Quantitäten man von den verschiedenen Komplementärfarben nehmen muß, um Weiß zu sehen, und diese Quantitäten sollten dann in retinale Energie umgerechnet werden (indem man auf die Absorption in der Macula lutea und auf die Energieverteilung in dem benutzten Spektrum Rücksicht nimmt).

Ich will jedoch gleich bemerken, daß ich durch meine eigenen Versuche nicht imstande war, Glans Satz zu verifizieren oder zu widerlegen. Bei meinen Versuchen wurde nämlich Auerlicht angewendet, und da man, wie früher erwähnt, nicht sicher sein kann, daß die Energiekurve für Auerlicht mit genügender Genauigkeit bestimmt ist, war es schon aus diesem Grunde nicht tunlich, die bei meinen Versuchen gefundenen Quantitätsbestimmungen für Komplementarfarben in retinale Energie umzurechnen. Selbst wenn man indessen eine genaue Bestimmung der Energiekurve für Auerlicht gehabt hätte, würden meine quantitativen Komplementarbestimmungen sich doch kaum dazu eignen, einer Energieumrechnung zugrunde gelegt zu werden, da ich sehr bezweifle, daß sie die Genauigkeit haben, die man bei dieser Art von Versuchen erwarten kann. Ich war, da ich im Jahre 1901 diese Versuche anstellte, nicht hinreichend klar über die Bedeutung, die es hat, daß man bei quantitativen Komplementärbestimmungen sogar sehr kleine Gesichtsfelder benutzt. Wenn man die Wellenlängen der Komplementärfarben bestimmt, scheint es freilich ganz gleichgiltig, ob man mit großen Gesichtsfeldern experimentiert.[1])

[1]) Vgl. z. B. in Tabelle XV die Werte für König — Reihe 1 und 2 —, wovon die erste gefunden ist bei Benutzung eines großen Gesichtsfeldes, die zweite mit einem kleinen Gesichtsfeld (ca. [illegible]). Diese zwei Komplementärkurven Königs sind ganz übereinstimmend, wenn man die kleine Placierungsdifferenz abrechnet, die wir früher besprochen und erklärt haben.

Der Grund, warum man, wenn man genaue quantitative Komplementärbestimmungen erhalten will, kleine Gesichtsfelder anwenden muß, liegt in der Rücksicht auf die absolute Absorption in der Macula lutea, ein Umstand, der besonders von Heringianischer Seite hervorgehoben worden ist. Die gelbe Pigmentschicht in der Macula lutea hat nämlich nicht überall dieselbe Dicke; die Macula kann am ehesten mit einer konkav-konvexen Linse verglichen werden, indem die gelbe Farbenschicht vom Zentrum der Macula nach außen gegen die Peripherie zu an Dicke abnimmt. Dies influiert nicht auf die relative Absorptionszahl, aber sofern wir z. B. die Quantitäten zu bestimmen wünschen, die man von den Farben in einem Komplementärpaar nehmen muß, um Weiß zu sehen, ist es einleuchtend, daß diese Quantitäten ungenau bestimmt werden, wenn man mit einem großen Gesichtsfelde arbeitet. Da ich nun gestehen muß, daß meine quantitativen Bestimmungen sogar mit einem ungewöhnlich großen Gesichtsfelde (12,5°) ausgeführt sind, wird es nahe liegen, zu vermuten, daß diese Bestimmungen nicht zu so genauen Resultaten geführt haben, die man auf diesem Gebiete erwarten und verlangen kann. Wenn wir desungeachtet im folgenden diese quantitativen Versuchsresultate anführen — doch natürlich, ohne sie in retinale Energie umzurechnen —, so geschieht das, weil sie möglicherweise irgend eine vorläufige Orientierung darbieten können, da sonst nirgends eine so durchgeführte Untersuchung der Komplementärfarben bei verschiedenen Beleuchtungen zu finden ist.[1])

Diese meine erwähnten Komplementärbestimmungen wurden von nur einem Observator, Dr. Alfr. Lehmann, ausgeführt. Die Versuche erfordern so große Aufmerksamkeit und Experimentierungsfähigkeit, daß es sehr schwierig ist, gewissenhafte und geübte Beobachter zu bekommen, deren Bestimmungen man vollen Glauben beimessen kann; die Übereinstimmung zwischen den Komplementärkurven der verschiedenen Observatoren ist übrigens, was die Form betrifft, so groß (siehe Tabelle XV), daß es möglich ist, sich auf die Resultate eines einzelnen Beobachters zu stützen, wenigstens was die qualitativen Bestimmungen anbelangt.

Die Komplementärbestimmungen, die Dr. Lehmann wohl-

[1]) Zu einer wirklich genauen Untersuchung des Glanschen Gesetzes lassen meine Versuche sich also nicht gebrauchen, und ich habe deshalb Assistenz bei Prof. v. Kries in Freiburg (siehe das Vorwort) gesucht, in dessen Laboratorium Dr. Angier und Dr. Trendelenburg das Verhältnis zwischen den Quantitäten der Komplementärfarben bei mittelstarker Beleuchtung bestimmt haben. Diese Versuche vom Laboratorium in Freiburg werden wir später, indem wir Umrechnung in retinale Energie vornehmen, dazu benutzen, dem Glanschen Gesetz gegenüber Stellung zu nehmen.

wollend ausführte, wurden mit einem früher erwähnten Farbenmischungsapparate angestellt.[1]) Der Beobachter, der in Dunkelkammer und mit dunkel adaptiertem Auge und zentraler Fixation arbeitete, hatte vor sich ein zirkulares Gesichtsfeld, dessen untere Hälfte von weißem Lichte erleuchtet wurde, während die obere Hälfte von einer homogenen Farbe oder von einer Mischung irgend welcher zwei homogenen Farben abwechselnd beleuchtet werden konnte. Da dasjenige Licht, das von der Lichtquelle des Apparates, einem Auerbrenner, ausstrahlte, nicht als ganz weiß betrachtet werden konnte, sondern eine entschieden gelbliche Farbe hatte, wurde vor dem Spalt, durch den das Auerlicht zu der unteren Hälfte des Gesichtsfeldes in den Apparat drang, eine Auflösung schwefelsauren Kupferammoniaks gestellt, die so beschaffen war, daß die untere Hälfte des Gesichtsfeldes jetzt von einem Lichte erfüllt wurde, das am Anfange des Versuches rein weiß erschien. Ich sage ausdrücklich „am Anfange des Versuches"; denn beim Mischen der Komplementärfarben erreichten wir das eigentümliche und unerwartete Resultat, daß das Vergleichslicht, welches wir am Anfange des Versuches mit vollständiger Sicherheit für weiß erklärt hatten, nicht mehr weiß erschien, wenn man gleichzeitig eine Mischung zweier Komplementärfarben in der oberen Hälfte des Gesichtsfeldes betrachtete. Sucht man z. B. die Komplementärfarbe für Gelb, so sieht man anfangs in der oberen Hälfte des Gesichtsfeldes eine weißlich gelbe oder weißlich blaue Farbe; doch wenn man das Verhältnis zwischen den Quantitäten der zwei Farben so lange abmißt, bis die Mischungsfarbe jede Spur ihrer spektralen Qualität verliert, wird man oben eine Farbe sehen, die „so weiß" ist, daß das Vergleichslicht, das man am Anfange des Versuches für weiß erklärte, jetzt entschieden gelblich ist. Diese Erscheinung wiederholt sich bei Mischung anderer Komplementärpaare, und man kann daraus den Schluß ziehen, daß wir in dem weißen Lichte, das durch Komplementärmischung entsteht, den typischen Repräsentanten für Weiß haben, d. h. dasjenige weiße Licht, das uns unbewußt eine Norm ist für unsere Schätzung einer reinen, weißen Farbe.[2]) Man kann natürlich sehr wohl das Verfahren wählen, daß man trotz dieser Beobachtung das gewählte Vergleichslicht festhält und beschließt, jede Komplementärmischung damit zu identifizieren. Das wird nur zur Folge haben, daß die Komplementärkurve, die man findet, einen etwas anderen

[1]) Siehe Philos. Studien, 1902, Bd. 20.

[2]) Man ist seit Newtons Tagen geneigt gewesen, das Sonnenlicht als typischen Repräsentanten für Weiß zu betrachten, obgleich man ohne nähere Untersuchung sehen kann, daß das Licht der Sonne gelblich ist.

Platz im Koordinatensystem bekommen wird; da es aber vollkommen sicher ist, daß jenes weiße Licht, das durch Mischung zweier Komplementärfarben entsteht, in ausgezeichnetem Grade rein weiß ist, wird es doch am natürlichsten sein, nicht allzu pedantisch beim Vergleichslichte stehen zu bleiben. Es muß wohl eingeräumt werden, daß das Vergleichslicht nicht nur sehr nützlich, sondern sogar unentbehrlich ist; doch sobald die Komplementärmischung ihre spektrale Qualität fast vollständig verloren hat, ist es wie gesagt möglich, eine Mischungsfarbe zu finden, die uns ein wenig weißlicher als das Vergleichslicht erscheint, und wir können mit gutem Grunde bei dieser Farbe stehen bleiben.

Wir werden jetzt durch ein einzelnes Beispiel, wenn $\lambda' = 656$ ist, Rechenschaft von dem Verfahren ablegen, das bei diesen Komplementärbestimmungen angewandt wurde.

Tabelle XXI.

$\lambda' = 656.$

1 h_1	2 $R_{\lambda'}$	3 λ''	4 $R_{\lambda''}$	5 h_2	6 H	7 $h_1 + h_2$	8 $\frac{R_{\lambda'}}{R_{\lambda''}}$
4	0,0021	512,5	0,00079	97	130	101	2,66
16	0,003	509	0,0027	169	240	185	1,11
64	0,0064	503	0,0051	244	400	308	1,25
256	0,02	500	0,023	397	1226	653	0,87
1024	0,076	499,5	0,084	2221	4381	3245	0,90
2048	0,13	498	0,15	2855	8648	4903	0,87
6207 [1])	0,29	498	0,34	5841	16161	12048	0,85

[1]) Siehe Anmerkung.

Tabelle XXI gibt das Resultat der Versuche an, wenn λ', die Farbe, für welche wir die Komplementärfarbe suchen, $= 656$ ist.

Am Anfange des Versuches sieht der Beobachter überhaupt nur etwas in der unteren Hälfte des Gesichtsfeldes, welche immer von einer weißen Farbe erfüllt ist. Man fing nun damit an, dieses weiße Licht zu vermindern, bis es eine Lichtstärke = 1 hatte.[1] Danach wurde die obere Hälfte des Gesichtfeldes von einem roten Lichte erleuchtet, dessen Wellenlänge $\lambda' = 656$ war, und dieses rote Licht wurde verfinstert, bis es gleich hell mit der Weißeinheit erschien. Hierbei zeigte es sich, daß die sehr lichtschwache Farbe in der oberen Hälfte des Gesichtsfeldes nur einen so unbedeutenden Schimmer der spektralen Qualität der Farbe (rot) hatte, daß es allzu unsicher, ja unmöglich war, die Komplementärfarbe dazu zu

[1]) Diese Einheit entspricht beinahe Königs Vergleichslichte A und ist etwa fünfmal so groß als der Schwellenwert.

suchen. Deshalb verstärkte man das weiße Licht in der unteren Hälfte des Gesichtsfeldes, indem man in regelmäßigen Intervallen vorwärts ging, bis diejenige Farbe, die hiermit gleich hell gemacht wurde ($\lambda' = 656$), so stark spektral gefärbt wurde, daß man nun meinte, die Komplementärfarbe dazu suchen zu können. In diesem Falle war doch die spektrale Qualität der Farbe — obgleich sehr wenig ausgeprägt — wesentlich über den entsprechenden spektralen Schwellenwert. Das weiße Vergleichslicht hatte damals eine Lichtstärke $h_1 = 4$ (siehe Tabelle XXI, Kolonne 1, oberste Reihe); und die Quantität der hiermit gleich hellen roten Farbe $R_{\lambda'}$ war $= 0{,}0021$ (siehe Tabelle XXI, Kolonne 2, oberste Reihe). Danach suchte man die Komplementärfarbe dieser roten Farbe zu finden (indem das weiße Licht in der unteren Hälfte des Gesichtsfeldes als Vergleichslicht diente) und kam hierdurch zu denjenigen Werten, die in den Kolonnen 3, 4 und 6 angeführt sind. Zu oberst in Kol. 3 ist der gefundene Wert der gesuchten Komplementärfarbe angegeben, λ'', der also $= 512{,}5$ ist; Kolonne 4 zeigt uns, welche Quantität man von λ'' nehmen muß, und in Kolonne 6 ist in der obersten Reihe die Lichtstärke (H) angegeben, die man dem weißen Lichte in der unteren Hälfte des Gesichtsfeldes geben muß, wenn es gleich hell mit der Komplementärmischung ($H = 130$) erscheinen soll. Das Vergleichslicht H bekommt übrigens, wie früher hervorgehoben, eine etwas weißgelbe Farbe, wenn es neben die Komplementärmischung gestellt wird. Wenn man H bestimmt hat, vergleicht man die gefundene Komplementärfarbe ($\lambda'' = 512{,}5$; $R_{\lambda''} = 0{,}00070$) mit Weiß und kommt hierdurch zu einem Weiß von der Lichtstärke $h_2 = 97$ (siehe oberste Reihe, Kolonne 5). — Danach fängt man an bei einer anderen stärkeren Beleuchtung zu experimentieren, indem man nun von einem weißen Lichte ausgeht, das $= 16$ ist ($h_1 = 16$, siehe Kolonne 1 in der nächst obersten Reihe der Tabelle XXI), und findet diejenige rote Farbe, die gleich hell hiermit ist ($\lambda' = 656$; $R_{\lambda'} = 0{,}003$, siehe Kolonne 2). Wenn diese Farbe gefunden ist, verfährt man genau wie bei der vorhergehenden Versuchsreihe um λ'', $R_{\lambda''}$, h_2 und H zu finden. Man kann also, indem man immer h_1, wie in Kolonne 1 angegeben, verstärkt und übrigens auf die einmal angenommene Weise verfährt, alle übrigen in Tabelle XXI angegebenen Werte erreichen.[1])

[1]) Den letzten und höchsten Wert von h_1 (h_1 = [illegible]) fand man, indem man das gewöhnliche Verfahren aufgab und von keinem bestimmten Wert von h_1 ausging, sondern von der stärksten roten Farbe, die der Apparat überhaupt passieren konnte, und verglich diese rote Farbe (λ' = [illegible]; $R_{\lambda'}$ = [illegible]) mit Weiß; hierdurch erreichte man das Resultat, daß h_2 = [illegible] ist. Übrigens verfuhr man auch bei der letzten Versuchsreihe wie oben angegeben.

Die Erläuterung, die zu Tabelle XXI gegeben ist, gilt auch, prinzipiell gesehen, für die folgenden Tabellen XXII—XXVIII. Wir verfahren auch bei den anderen Farben so: wenn wir die Komplementärfarbe zu einer anderen λ' suchen, auf ganz dieselbe Weise, wählen also als Ausgangspunkt (als den geringsten Wert von h_1) ein weißes Licht, das so stark ist, daß die hiermit gleich helle Farbe λ' eine so entschieden spektrale Qualität hat, daß wir ihre Komplementärfarbe bestimmen und übrigens die anderen Größen nach der angegebenen Methode finden können. Es könnte vielleicht merkwürdig erscheinen, daß wir nicht Komplementärfarben gesucht haben zu Farben, die brechbarer als 460 sind. Es zeigte sich indessen bei unseren Versuchen, daß jede Farbe jenseits 460 mit 460 identifiziert werden kann, wenn man die Lichtstärke der letztgenannten Farbe vermindert, woraus folgt, daß die Farben, die brechbarer als 460 sind, dieselbe Komplementärfarbe wie 460 haben (das gilt wenigstens sowohl Dr. Lehmanns Auge, als auch dem meinigen). Die fehlende Fähigkeit unseres Auges, Farbentonänderungen in der Nähe von der einen Grenze des Spektrums zu beobachten, führt also mit sich, daß die Komplementärkurve geradlinig von $\lambda = 460$ wird. — Farben, die weniger brechbar als 656 sind, konnte man mit dem benutzten Apparate gar nicht untersuchen. —

Da die Versuche zeigen, daß diejenigen Werte von H, die in der obersten Reihe der Komplementärtabellen ausgeführt sind, um den numerischen Wert 100 schwanken, würde ich, falls ich jetzt die Versuche bei schwacher Beleuchtung wiederholen sollte, unbedingt ein anderes Verfahren wählen, d. h. alle Komplementärpaare mit einem weißen Vergleichslichte von einer Lichtstärke = 100 identifizieren. Es ist offenbar viel zuverlässiger, die niedrigste Beleuchtungsstufe auf die Weise zu bestimmen, statt das ziemlich unbestimmte Verfahren zu benutzen, Farben aufzusuchen, deren spektrale Qualität so ausgeprägt ist, daß man meint, ihre Komplementärfarben bestimmen zu können.

Tabelle XXII.

$\lambda' = 620.$

1 h_1	2 $R_{\lambda'}$	3 λ''	4 $R_{\lambda''}$	5 h_2	6 H	7 $h_1 + h_2$	8 $\frac{R_{\lambda'}}{R_{\lambda''}}$
8	0,00028	507	0,00082	119	120	127	0,34
16	0,00073	503,5	0,0027	217	256	233	0,27
64	0,0017	502	0,0076	342	482	406	0,22
256	0,0072	499	0,028	586	1547	842	0,26
1024	0,017	498,5	0,11	2591	4953	3615	0,15
4096	0,085	497,5	0,29	7425	12230	11521	0,29
15862	0,23	497	0,87	18000	43678	33862	0,26

Tabelle XXIII.

$\lambda' = 600.$

1	2	3	4	5	6	7	8
h_1	$R_{\lambda'}$	λ_2	$R_{\lambda''}$	h_2	H	$h_1 + h_2$	$\frac{R_{\lambda'}}{R_{\lambda''}}$
16	0,00032	500	0,0017	105	106	121	0,19
64	0,00088	498	0,007	332	443	396	0,13
256	0,0041	496,5	0,016	517	1345	773	0,26
1024	0,0092	494	0,086	2432	4901	3456	0,11
4096	0,037	494	0,21	5276	12230	9372	0,18
22069	0,17	494	0,87	16759	43678	38828	0,20

Tabelle XXIV.

$\lambda' = 585.$

1	2	3	4	5	6	7	8
h_1	$R_{\lambda'}$	λ''	$R_{\lambda''}$	h_2	H	$h_1 + h_2$	$\frac{R_{\lambda'}}{R_{\lambda''}}$
16	0,00037	494	0,0016	74	123	90	0,23
64	0,00066	494	0,002	130	157	194	0,33
256	0,003	491	0,015	215	1038	471	0,20
1024	0,0097	492	0,03	845	3145	1869	0,32
4096	0,036	487,5	0,17	1770	10483	5866	0,21
40230	0,2	487,5	0,87	18391	43678	58621	0 23

Tabelle XXV.

$\lambda' = 575.$

1	2	3	4	5	6	7	8
h_1	$R_{\lambda'}$	λ''	$R_{\lambda''}$	h_2	H	$h_1 + h_2$	$\frac{R_{\lambda'}}{R_{\lambda''}}$
64	0,00058	486,5	0,0014	58	77	122	0,41
256	0,0029	485	0,0052	133	482	389	0,56
1024	0,011	486,5	0,029	414	1834	1438	0,38
4096	0,043	486	0,099	1216	5897	5312	0,43
31034	0,29	486	0,87	10000	45977	41034	0,33

Tabelle XXVI.

$\lambda' = 480.$

1	2	3	4	5	6	7	8
h_1	$R_{\lambda'}$	λ''	$R_{\lambda''}$	h_2	H	$h_1 + h_2$	$\frac{R_{\lambda''}}{R_{\lambda'}}$
16	0,0011	569	0,00019	24	42	40	0,17
64	0,0023	569	0,00082	119	192	183	0,36
256	0,04	569	0,01	923	1559	1179	0,25
1024	0,22	569	0,046	5664	7000	6688	0,21

Tabelle XXVII.

$\lambda' = 470$.

1	2	3	4	5	6	7	8
h_1	$R_{\lambda'}$	λ''	$R_{\lambda''}$	h_2	H	$h_1 + h_2$	$\frac{R_{\lambda''}}{R_{\lambda'}}$
16	0,0021	563	0,00041	40	67	56	0,2
64	0,01	563	0,003	164	203	228	0,3
256	0,064	563	0,016	1207	3267	1463	0,25
1024	0,24	563	0,12	6638	10483	7662	0,5

Tabelle XXVIII.

$\lambda' = 460$.

1	2	3	4	5	6	7	8
h_1	$R_{\lambda'}$	λ''	$R_{\lambda''}$	h_2	H	$h_1 + h_2$	$\frac{R_{\lambda''}}{R_{\lambda'}}$
16	0,0029	560	0,00056	51	98	67	0,19
64	0,0097	560	0,00069	84	173	148	0,071
256	0,072	561,5	0,013	1172	2005	1428	0,18
1024	0,39	559	0,11	12897	17034	13921	0,28

Zuerst wollen wir das Komplementärproblem von der qualitativen Seite betrachten, indem wir die Bedeutung der gefundenen Zahlen für λ'' untersuchen (siehe Tabelle XXI—XXVIII, Kol. 3). Diese Zahlen für λ'' zeigen, wie man auch nach E. Tonns Versuchen erwarten konnte, daß die Komplementärfarben sich etwas verschieben, wenn die Beleuchtung variiert. Die Verschiebung ist am größten, wenn wir die Komplementärfarbe zu $\lambda' = 656$ suchen, und wird nach und nach kleiner, je mehr λ' sich allmählich dem Gelbgrünen ($\lambda' = 575$) nähert. Suchen wir die Komplementärfarben zu Farben, die in der brechbarsten Hälfte des Spektrums liegen ($\lambda' = 480$, 470, 460), so bewegen diese Komplementärfarben sich gar nicht, oder wenigstens so wenig, daß es bei unseren Versuchen nicht konstatiert werden konnte, selbst wenn die Beleuchtung innerhalb der möglich weitesten Grenzen variierte — was übrigens bei diesen verhältnismäßig lichtschwachen Farben nicht viel besagt.

Fig. IX zeigt die Komplementärkurve bei stärkster und schwächster Beleuchtung, der obersten und untersten Reihe in den Tabellen XXI—XXVIII, Kol. 3, entsprechend. Wir richten jetzt unsere Aufmerksamkeit auf die Werte von λ'', die der schwächsten Beleuchtung entsprechen. Diese Werte sind in Tabelle XXIX zusammengestellt, und wir werden unsere früheren Untersuchungen wieder aufnehmen, indem wir probieren, ob die Komplementärkurve für diese schwache Beleuchtung eine gleichseitige Hyperbel ist.

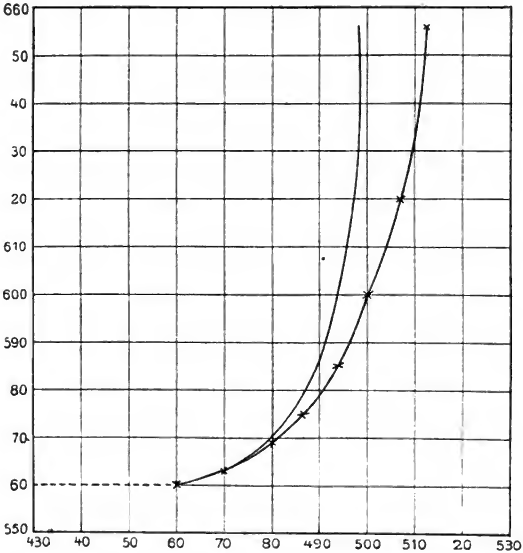


Fig. IX.

Tabelle XXIX.

	1	2	3	4	5	6	7	8
λ'	656	620	600	585	575	480	470	460
λ''	512,5	507	500	494	486,5	569	563	560

Wir gehen also von der Gleichung:

$(\lambda' - c)\ (\lambda'' - c) = \div \frac{a^2}{2}$ aus, wo die Konstanten a und c dieselbe Bedeutung wie früher haben.

Zu vorläufig approximativer Bestimmung der Konstanten a und c werden die Wellenlängen für zwei willkürlich gewählte komplementäre Farbenpaare (das 4. und das 6.) eingesetzt, und hierdurch kommt man zu den Gleichungen:

$$(585 - c)(494 - c) = \div \frac{a^2}{2}$$

$$(480 - c)(569 - c) = \div \frac{a^2}{2}$$

Hieraus erhält man zwei Werte für c und a, die wir mit C und A bezeichnen, indem $C = 529$ und $A = 62{,}61$ ist. Die wirklichen Werte der zwei Konstanten nennen wir c und a, wo $c = C + \gamma$ und $a = A + \alpha$. Durch die Methode der kleinsten Quadrate findet man:

$$c = C + \gamma = 529 + 0{,}093 = 529{,}093$$
$$a = A + \alpha = 62{,}61 + 0{,}628 = 63{,}238$$

Diese Werte für a und c werden jetzt als A und C in den Formeln substituiert, und die ganze Berechnung wird auf vollständig analoge Weise wiederholt. Wir bekommen dann als zweite Approximation:

$$c = C + \gamma = 529{,}093 \div 0{,}009 = 529{,}084$$
$$a = A + \alpha = 63{,}238 + 0{,}000 = 63{,}238.$$

Die Hyperbelgleichung bekommt also die Form:

$$(\lambda' - 529{,}084)\ (\lambda'' - 529{,}084) = \div \frac{(63{,}238)^2}{2}$$

Ist λ' bekannt, so kann man durch diese Gleichung λ'' berechnen; die hierdurch gefundenen Werte sind in Tabelle XXX angeführt.

Tabelle XXX.

observ. λ'	observ. λ''	berech. λ''	Fehler
656	512,5	513,3	+ 0,8
620	507	507,1	+ 0,1
600	500	500,9	+ 0,9
585	494	493,3	÷ 0,7
575	486,5	485,5	÷ 1,0
480	569	569,8	+ 0,8
470	563	562,9	÷ 0,1
460	560	558,0	÷ 2,0

Diese Tabelle zeigt, daß die Fehler viel kleiner werden, wenn man Komplementärfarben bei stark niedergesetzter Beleuchtung bestimmt; außerdem verschwindet die regelmäßige Fehlerverteilung (der Gang in den Fehlern), die so ausgeprägt ist, wenn man Komplementärfarben bei stärkerer Beleuchtung bestimmt. Deshalb ist es nun außer allem Zweifel, daß die Komplementärkurve — bei schwacher Beleuchtung, d. h. einer Beleuchtungsstufe entsprechend, wo das Vergleichslicht H eine Lichtstärke etwa $= 100$ hat — eine gleichseitige Hyperbel ist.

Nachdem wir jetzt gesehen haben, was unsere Experimente uns von der qualitativen Seite des Komplementärproblems lehren, wollen wir untersuchen, welche Schlüsse man von unseren quantitativen Komplementärbestimmungen ziehen kann. Was den gesuchten Beweis für Ebbinghaus' Satz anbelangt, wird man, wenn man die Kolonne 6 und 7 in den Tabellen XXI—XXVIII vergleicht, sehen, daß vieles für die Richtigkeit des Satzes spricht, also dafür, daß $h_1 + h_2 = H$ ist. Wenn man Rücksicht darauf nimmt, daß bedeutende Fehler begangen werden können, indem eine Spektralfarbe mit weißem Lichte verglichen wird, und wenn man zugleich berücksichtigt, daß solche Vergleiche hier mehrmals gemacht werden, kann man vielleicht keine bessere Übereinstimmung erwarten. Übrigens muß erinnert werden, daß unsere Quantitätsbestimmungen — weil bei den Versuchen ein allzu großes Gesichtsfeld benutzt worden ist — eigentlich nur zu vorläufiger Orientierung dienen können. Ob man indessen den Satz von Ebbinghaus als bewiesen betrachten will oder wenigstens durch unsere Versuche als wahrscheinlich gemacht, beruht wesentlich darauf, welche Bedeutung man dem Faktum beilegen will, daß H fast überall heller als $h_1 + h_2$ ist. Die größte Abweichung von Ebbinghaus' Satz findet sich für $\lambda' = 656$ und für ihre Komplementärfarbe; das kann vielleicht davon herrühren, daß es, selbst bei schwachen Beleuchtungen, etwas schwieriger ist eine rote Farbe als irgend welche andere Farbe mit Weiß zu vergleichen. —

Rücksichtlich des Glanschen Satzes können wir aus den früher angeführten Gründen durch unsere quantitativen Komplementärbestimmungen seine Gültigkeit nicht untersuchen. Die angeführten Werte von $R_{\lambda'}$ und $R_{\lambda''}$ sind kaum so zuverlässig, daß sie sich darin eignen, zugrunde gelegt zu werden bei einer Umrechnung in Energie. Es hat doch ein gewisses Interesse, die Werte zu untersuchen, die wir für das Verhältnis $\frac{R_{\lambda'}}{R_{\lambda''}}$ (oder $\frac{R_{\lambda''}}{R_{\lambda'}}$) gefunden haben. Dieses Verhältnis scheint nämlich für dieselben Komplementärfarben (siehe die Tabellen XXI—XXVIII) einigermaßen unabhängig von den Beleuchtungsvariationen zu sein. Nur für $\lambda' = 656$ und ihre Komplementärfarbe gilt dieses nicht, indem $\frac{R_{\lambda'}}{R_{\lambda''}}$ hier ziemlich gleichmäßig bei wachsender Beleuchtung abnimmt. Daß sonst das Verhältnis $\frac{R_{\lambda'}}{R_{\lambda''}}$ von derjenigen Beleuchtung, womit experimentiert wird, unabhängig zu sein scheint, hat namentlich deshalb Interesse, weil wir daraus schließen können, daß auch das Verhältnis zwischen den retinalen Energien (für die-

selben Komplementärpaare) $\frac{E_{\lambda'}}{E_{\lambda''}}$ von der Beleuchtungsvariation unabhängig sein wird.[1])

Da es nun unmöglich oder wenigstens zweifelhaft war, ob man durch meine Versuche untersuchen konnte, ob Glans Gesetz richtig ist, suchte ich, wie früher erwähnt, Hilfe bei Professor v. Kries in Freiburg. Wie jedem Sachkundigen bekannt, sind vom Laboratorium des Professors v. Kries so viele von den Arbeiten ausgegangen, die jetzt das Fundament der Farbenlehre bilden, und die Technik der Farbenmischung ist hier zu einem hohen Grad von Vollkommenheit entwickelt worden. Professor v. Kries kann wohl im ganzen genommen als der hervorragendste Spezialforscher auf diesem Gebiete betrachtet werden, und ich wandte mich deshalb an ihn und bat, daß im Laboratorium in Freiburg einige quantitative Komplementärversuche angestellt werden dürften, durch welche man die Gültigkeit des Glanschen Gesetzes probieren könnte. Professor v. Kries zeigte sich mir gegenüber sehr zuvorkommend, und mit seiner Erlaubnis veröffentliche ich hier die quantitativen Komplementärbestimmungen, die im Laboratorium in Freiburg ausgeführt wurden.

Tabelle XXXI.

Mengenverhältnis komplementärer Spektralfarben.

Spektrum des Triplex-Gaslichts.

Zentral beobachtet. Feldgröße 1,5°.

Einheiten sind die Helligkeiten im prismatischen Spektrum des Triplexbrenners.

Mittelwerte.

Beobachter Dr. Angier			Beobachter Dr. Trendelenburg		
Wellenlänge des langwelligen Lichts λ'	Wellenlänge des kurzwelligen Lichts λ''	Mengenverhältnis der Lichter $\lambda':\lambda''$ (die Menge für λ' überall = 1 gesetzt)	Wellenlänge des langwelligen Lichts λ'	Wellenlänge des kurzwelligen Lichts λ''	Mengenverhältnis der Lichter $\lambda':\lambda''$ (die Menge für λ' überall = 1 gesetzt)
669,3	490,9	1 : 8,791	669,4	491,2	1 : 9,202
654,6	489,0	1 : 18,281	654,9	490,5	1 : 18,826
641,2	490,2	1 : 27 121	641,3	490,4	1 : 27,191
628,1	487,9	1 : 41,343	628,4	489,2	1 : 39,976
616,2	487 4	1 : 44,440	616,2	487,9	1 : 44,429
604,8	487,0	1 : 38,944	604,8	487,3	1 : 40,316
593,8	484,7	1 : 31,637	593,9	485,7	1 : 30,576
583,3	480,6	1 : 22,181	583,5	482,8	1 : 19,964
572,9	473,3	1 : 14 029	572,4	469,1	1 : 11,779

[1]) Daß $\lambda' = 656$ und ihre Komplementärfarbe entschieden eine Ausnahme von dieser Regel zu bilden scheinen, daran ist vielleicht teilweise die oft erwähnte Farbentonverschiebung schuld, die hier am meisten ausgeprägt ist. Diese Verschiebung ist übrigens kaum so groß, daß sie allein die Abweichung erklären kann.

Tabelle XXXII.

Angier			Trendelenburg		
λ'	λ''	$\frac{E_{\lambda'}}{E_{\lambda''}}$	λ'	λ''	$\frac{E_{\lambda'}}{E_{\lambda''}}$
669,3	490,9	2,722	669,4	491,2	2,603
654,6	489,0	1,159	654,9	490,5	1,110
641,2	490,2	0,659	641,3	490,4	0,657
628,1	487,9	0,386	628,4	489,2	0,395
616,2	487,4	0,307	616,2	487,9	0,300
604,8	487,0	0,308	604,8	487,3	0,294
593,8	484,7	0,327	593,9	485,7	0,338
583,3	480,6	0,437	583,5	482,8	0,464
572,9	473,3	0,710	572,4	469,1	0,906

Die Observatoren waren Dr. Angier und Dr. Trendelenburg, denen ich vielen Dank schuldig bin für die Hilfe, die sie mir geleistet haben. Die Versuche wurden mit dem bekannten Helmholtzschen Farbenmischungsapparate angestellt, und man erreichte hierbei das in der Tabelle XXXI angeführte Resultat.[1]) Diese Tabelle zeigt, daß eine erstaunend gute Übereinstimmung zwischen den Resultaten der zwei Observatoren stattfindet, woraus erscheint, daß wir hier sehr fein ausgeführte Versuche vor uns haben. Wenn wir die Energiekurve für Triplexlicht benutzen — welche übrigens mit der Energiekurve für Hefnerlicht zusammenfällt — und diese Quantitätsbestimmungen in Energie umrechnen und außerdem die elektive Absorption in der Macula berücksichtigen (indem wir die von Sachs gefundenen Durchlässigkeitskoeffizienten benutzen), erreichen wir die in Tabelle XXXII angeführten Werte $\frac{E_{\lambda'}}{E_{\lambda''}}$, die das Verhältnis zwischen den retinalen Energien angeben, die gefordert werden, damit wir Weiß durch Mischung von Komplementärfarben sehen können. Betrachtet man die Zahlen in dieser Tabelle, so sieht man sogleich, daß Glans Gesetz unmöglich richtig sein kann. Das Verhältnis $\frac{E_{\lambda'}}{E_{\lambda''}}$ ist nicht konstant, noch weniger $= 1$, sondern verschieden für die verschiedenen Komplementärpaare. Stellen wir die in Tabelle XXXII angeführten Werte von

[1]) Von dem Vergleichslicht schreibt v. Kries: „Das Vergleichslicht war ein Auerlicht mit Milchglasglocke, das durch vorgesetzte gefärbte Flüssigkeiten derart modifiziert war, daß es einer von Tageslicht bei gleichmäßig bedecktem Himmel beleuchteten Magnesiumoxydfläche gleich erschien."

$\frac{E_{\lambda'}}{E_{\lambda''}}$ graphisch dar, indem wir auf der Abszissenachse die Wellenlängen λ' absetzen und auf der Ordinatenachse die Mittelzahlen der in der Tabelle angeführten Werte $\frac{E_{\lambda'}}{E_{\lambda''}}$ für die zwei Observatoren, so kommt hierdurch die in Fig. X abgebildete Kurve heraus. Bei Fig. X sieht man, daß durch diejenigen Punkte, denen die Observationen entsprechen, eine ganz glatte Kurve gezogen werden kann, die um die Ordinate zu $\lambda' = 608$ fast vollständig symmetrisch liegt und übrigens bedeutende Ähnlichkeit mit einer Parabel hat. Man bekommt also durch die Versuche von Dr. Angier und Dr. Trendelenburg einen schönen Ersatz für das Glansche „Gesetz".

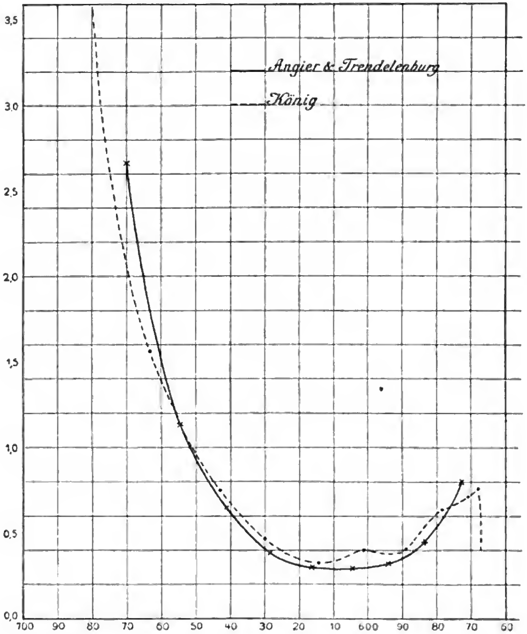


Fig. X.

Für eine definitive Bestimmung der retinalen Energien der Komplementärfarben könnte man nur noch eine Reihe quantitativer Komplementärbestimmungen wünschen, die bei sehr verschiedenen Beleuchtungsstufen angestellt wären. Da es indessen bei meinen eigenen vorläufigen Versuchen sich gezeigt hat, daß das Verhältnis $\frac{R_{\lambda'}}{R_{\lambda''}}$ — und deshalb auch das Verhältnis $\frac{E_{\lambda'}}{E_{\lambda''}}$ — für dieselben Komplementärpaare von der Beleuchtungsvariation unabhängig zu sein scheint, ist einiger Grund, anzunehmen, daß die von Angier und Trendelenburg gefundenen Resultate auch bei schwacher Beleuchtung gelten. Es wird doch notwendig sein, zu untersuchen, ob das wirklich der Fall ist, besonders weil das Verhältnis $\frac{E_{\lambda'}}{E_{\lambda''}}$ bei meinen Versuchen für $\lambda' = 656$ nicht von der Beleuchtung unabhängig war. Auf diesem Punkte müssen wir also auf zukünftige supplierende Untersuchungen hinweisen. — Da wir früher, was die qualitative Seite des Komplementärproblems, die Bestimmung der Wellenlängen, anbelangt, schon gezeigt haben, daß die Komplementärkurve bei schwacher Beleuchtung sich etwas verschiebt, und daß sie erst da wirklich eine gleichseitige Hyperbel wird, können wir in Analogie hiermit vermuten, daß auch die Kurve für das Verhältnis zwischen den retinalen Energien der Komplementärfarben sich ein wenig verschieben wird, wenn die Beleuchtung abnimmt; und will man den Analogieschluß durchführen, könnte man vermuten, daß die Kurve sich so viel und in solcher Richtung verschiebt, daß sie in diesem Falle eine wirkliche Parabel wird und nicht wie bei mittelstarker Beleuchtung nur eine parabelähnliche Kurve. Doch versteht es sich von selbst, daß man einem solchen Analogieschluß keine wesentliche Bedeutung beilegen kann; sie ist eben nur eine Vermutung, die doch den Vorzug hat, daß sie durch supplierende Versuche bestätigt oder widerlegt werden kann.

Was die quantitativen Komplementärbestimmungen vom Laboratorium zu Freiburg betrifft, ist es übrigens interessant, die Übereinstimmung zu bemerken, die zwischen diesen Versuchen und einigen, die König angestellt hat, stattfindet. Im Jahre 1896 hat König[1]) — doch ohne Energieumrechnung vorzunehmen — angegeben, welche Breite er den Spalten seines Spektralapparates geben mußte, um durch Mischung von Komplementärfarben Weiß zu sehen. Diese Bestimmungen Königs sind mittelst eines kleinen Gesichtsfeldes vorgenommen worden; und wenn sie, wie man leicht

[1]) Sitzungsber. d. Berliner Akad. Bd. 2, p. 945—50.

sieht, mit denen von Angier und Trendelenburg sich nicht messen können, ist der Grund offenbar, daß König ein wenig parazentral observiert hat. Merkwürdigerweise hat König bei diesen Versuchen unterlassen anzugeben, mit welcher Lichtquelle er gearbeitet hat. Wollen wir indessen voraussetzen, daß König hier wie bei seinen meisten anderen Versuchen einen Triplexbrenner benutzt hat, und wenn wir unter dieser Voraussetzung eine Umrechnung in retinale Energie vornehmen, erreichen wir die Werte für das Verhältnis $\frac{E_{\lambda'}}{E_{\lambda''}}$, die in Tabelle XXXIII angeführt sind.

Tabelle XXXIII.

König		
λ'	λ''	$\frac{E_{\lambda'}}{E_{\lambda''}}$
681,8	490,1	5,36
663,7	490,0	1,56
645,9	489,7	0,74
629,7	489,2	0,47
614,7	488,3	0,32
601,2	486,9	0,41
588,9	484,6	0,40
578,4	478,2	0,64
570,8	462,5	0,71
568,2	436,8	0,75
567,9	422,2	0,30

In Fig. X ist die Kurve für Königs Bestimmungen von $\frac{E_{\lambda'}}{E_{\lambda''}}$ gezeichnet, und man sieht hieraus, daß im großen und ganzen eine ganz gute Übereinstimmung zwischen Königs Versuchen und den Versuchen vom Laboratorium zu Freiburg herrscht. Daß Königs Bestimmungen, wie der unebene Lauf der Kurve zeigt, entschieden hinter denen von Angier und Trendelenburg zurückstehen, rührt offenbar davon her, daß König, wie gesagt, parazentral observiert hat, was wohl immer die Genauigkeit der Resultate beeinflussen wird.

§ 4.

Schluß.

Als ich vor einigen Jahren zum ersten Male von Doves Versuchen über binokuläre Farbenmischung las, hatte das zur Folge, daß ich gezwungen wurde, einen Gedanken aufzugeben, den ich lange mit Vorliebe festgehalten hatte, nämlich daß das Komplementärproblem auf physischem Wege, mittelst der Wellentheorie,

gelöst werden könne. Ich hatte früher die Überzeugung gehegt, daß jenes gesetzmäßige, konstante Verhältnis zwischen den Wellenlängen der Komplementärfarben, das durch die gleichseitige Hyperbel der Komplementärfarben ausgedrückt ist, dadurch erklärt werden könne, daß wir hier einer ganz physischen Erscheinung gegenüberstehen. Dieser Gedanke, gegen welchen übrigens auch aus anderen Gründen wesentliche Einwände erhoben werden können, muß indessen ganz aufgegeben werden, wenn man die Bedeutung der Versuche von Dove erwägt. Es gelang nämlich Dove, mittelst des Stereoskops zu zeigen, daß man durch gleichzeitige Beeinflussung eines Auges durch eine Spektralfarbe und des anderen Auges durch die Komplementärfarbe dieser Farbe eine weiße Mischungsfarbe sehen kann.[1]) Hieraus kann geschlossen werden, daß die Vereinigung von Komplementärfarben nicht an die Netzhaut geknüpft zu werden braucht, sondern in dem tiefer gelegenen Zentralorgan vor sich gehen kann und möglicherweise immer da vorgeht. Hierdurch wird jeder Versuch, das Komplementärproblem auf rein physischem Wege zu erklären, unmöglich gemacht. Wenn hierzu kommt, daß man, auf gute Gründe gestützt, jede psychologische Erklärung des Problems aufgegeben hat, scheint keine andere Auskunft möglich als eine physiologische Erklärung. Um so mehr zu bedauern ist es, daß die Physiologie vorläufig uns gar keine Aufklärung gibt, wie die Gesetzmäßigkeit der Komplementärfarben zu erklären sei. Nach der Kenntnis, die ich augenblicklich von der Farbenlehre besitze, kommt es mir am wahrscheinlichsten vor, daß die Lösung auf elektro-physiologischem Wege gesucht werden muß; eine Sicherheit hierfür hat man jedoch keineswegs.

Das Komplementärproblem scheint mir im großen und ganzen so schwierig zu lösen, daß derjenige, der es versucht, mit gutem Grunde denselben Wahlspruch wie die alte „Accademia del Cimento“ wählen kann: provando e riprovando.

Schließlich muß ich bedauern, daß ich in vorliegender Arbeit nur ausnahmsweise auf die Fachliteratur, die nach 1903/04 veröffentlicht worden, Rücksicht genommen habe. Damals war nämlich diese Abhandlung zum Abschluß gebracht, und, da eine zuerst beabsichtigte dänische Ausgabe langwierigen Hindernissen begegnete und deshalb unterblieb, ist ihre Herausgabe so sehr verspätet worden. **H. K.**

[1]) Dove hat schon im Jahre 1841 dies gezeigt (Monatsber. d. Berliner Akad. p. 250); übrigens hat de Haldat früher dasselbe ohne Stereoskop gesehen (Journal de Physique 1806), und seine Beobachtungen sind von Brücke bestätigt worden (Pogg. Ann. 1853, Bd. 90, p. 606 f.).